

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2004 年 5 月 21 日 (21.05.2004)

PCT

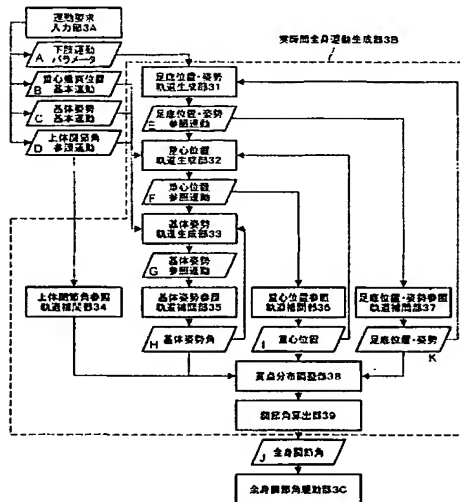
(10) 国際公開番号
WO 2004/041484 A1

- (51) 国際特許分類⁷: B25J 5/00 (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): ソニー株式会社 (SONY CORPORATION) [JP/JP]; 〒141-0001 東京都品川区北品川 6 丁目 7 番 3 5 号 Tokyo (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2003/013870
- (22) 国際出願日: 2003 年 10 月 29 日 (29.10.2003)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2002-322582 2002 年 11 月 6 日 (06.11.2002) JP
特願 2003-365549 2003 年 10 月 27 日 (27.10.2003) JP
- (72) 発明者; および
(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 長阪 憲一郎 (NAGASAKA, Kenichiro) [JP/JP]; 〒141-0001 東京都品川区北品川 6 丁目 7 番 3 5 号 ソニー株式会社内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 山田 英治, 外 (YAMADA, Eiji et al.); 〒104-0041 東京都中央区新富一丁目 1 番 7 号 銀座ティークエビル 澤田・宮田・山田特許事務所 Tokyo (JP).

[続葉有]

(54) Title: ROBOT DEVICE, MOTION CONTROL DEVICE FOR ROBOT DEVICE AND MOTION CONTROL METHOD

(54) 発明の名称: ロボット装置、ロボット装置の運動制御装置及び運動制御方法



- 3A... MOTION REQUEST INPUT UNIT
A... LOWER LIMB MOTION PARAMETERS
B... CENTER-OF-GRAVITY VERTICAL POSITION BASIC MOTION
C... BASIC ATTITUDE BASIC MOTION
D... UPPER BODY-PART JOINT ANGLE REFERENCE MOTION
31... SOLE POSITION/ATTITUDE PATH GENERATION UNIT
E... SOLE POSITION/ATTITUDE REFERENCE MOTION
32... CENTER-OF-GRAVITY POSITION PATH-GENERATION UNIT
F... CENTER-OF-GRAVITY POSITION REFERENCE MOTION
33... BAS-C ATTITUDE PATH GENERATION UNIT
G... BASIC ATTITUDE REFERENCE MOTION
34... UPPER BODY-PART JOINT ANGLE REFERENCE PATH INTERPOLATION UNIT
35... BAS-C ATTITUDE REFERENCE PATH INTERPOLATION UNIT
H... BASIC ATTITUDE ANGLE
36... CENTER-OF-GRAVITY POSITION REFERENCE PATH-INTERPOLATION UNIT
37... SOLE POSITION/ATTITUDE REFERENCE PATH INTERPOLATION UNIT
I... CENTER-OF-GRAVITY POSITION
38... MASS POINT DISTRIBUTION ADJUSTMENT UNIT
J... JOINT ANGLE CALCULATION UNIT
39... WHOLE BODY JOINT ANGLE
3C... REAL-TIME WHOLE BODY MOTION GENERATION UNIT
3C... WHOLE BODY JOINT ANGLE DRIVE UNIT
K... SOLE POSITION/ATTITUDE

(57) Abstract: A boundary condition-carrying motion equation relating to the future center-of-gravity horizontal path of a robot is solved so that moment around a horizontal axis around a point in a supporting polygon at ground contact is zero or a horizontal-direction translation force at no ground contact is zero, and a continuous connection to the current center-of-gravity horizontal position/speed is ensured, a boundary condition-carrying motion equation relating to the future center-of-gravity vertical path of a robot is solved so that a vertical-direction translation force excluding gravity acting at no ground contact is zero, and a continuous connection to the current center-of-gravity vertical position/speed is ensured, and the next-clock motion status is determined so that moment around center-of-gravity moment at no ground contact is zero and the above determined center-of-gravity position is realized. Accordingly, a stable motion pattern for transition between ground contact and no ground contact can be generated in real time.

(57) 要約: 接地時の支持多角形内の点回りの水平軸回りモーメントが 0 又は無接地時の水平方向並進力が 0 で、現在の重心水平位置・速度に連続的に接続するように将来のロボットの重心水平軌道に関する境界条件付運動方程式を求解し、無接地時に重力以外に作用する垂直方向並進力が 0 となり、現在の重心垂直位置・速度に連続的に接続するように将来のロボットの重心垂直軌道に関する境界条件付運動方程式を求解し、無接地時に重心モーメント回りモーメントが 0 となり、上記決定した重心位置を実現するように次時刻の運動状態を決定する。これによって、接地・無接地間を遷移する安定な運動パターンを実時間で生成することができる。

BEST AVAILABLE COPY



(81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR),
OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:
— 国際調査報告書

(84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特許

2 文字コード及び他の略語については、定期発行される各 PCT ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

明 細 書

ロボット装置、ロボット装置の運動制御装置並びに運動制御方法

5 技術分野

本発明は、少なくとも複数本の可動脚を備えたロボット装置、ロボット装置の運動制御装置並びに運動制御方法に係り、特に、歩行などの接地期間のみからなる運動以外に、走行や跳躍などの接地期間と無接地期間とが混在するロボット装置、ロボット装置の運動制御装置並びに運動制御方法に関する。

さらに詳しくは、本発明は、歩行・停止状態と走行・跳躍との遷移に対応し、不規則な接地運動・無接地運動間の遷移に対しても動力的バランスを適切に維持しながらシームレスに運動状態を変更するロボット装置、ロボット装置の運動制御装置並びに運動制御方法に係り、特に、接地運動・無接地運動間を遷移する安定な運動パターンを実時間で生成するロボット装置、ロボット装置の運動制御装置並びに運動制御方法に関する。

背景技術

20 電氣的若しくは磁氣的な作用を用いて人間の動作に似せた運動を行う機械装置のことを「ロボット」という。ロボットの語源は、スラブ語の“ROBOTA（奴隷機械）”に由来すると言われている。わが国では、ロボットが普及し始めたのは1960年代末からであるが、その多くは、工場における生産作業の自動化・無人化などを目的としたマニピュレータや搬送ロボットなどの産業用ロボット（i
25 ndustrial robot）であった。

最近では、ヒトやサルなどの2足直立歩行を行う動物の身体メカニズムや動作を模した脚式移動ロボットに関する研究開発が進展し、実用化への期待も高まってきている。ヒトの生体メカニズムや動作を再現した脚式移動ロボットのことを、特に、「人間形」、若しくは「人間型」のロボット（humanoid robot）

と呼ぶ。

- 2足直立による脚式移動は、クローラ式や、4足又は6足式などに比し不安定で姿勢制御や歩行制御が難しくなるが、不整地や障害物など作業経路上に凹凸のある歩行面や、階段や梯子の昇降など不連続な歩行面に対応することができるなど、柔軟な移動作業を実現できるという点で優れている。

- 2足の脚式移動ロボットに関する姿勢制御や安定歩行に関する技術は既に数多提案されている。ここで言う安定な「歩行」とは、「転倒することなく、脚を使って移動すること」と定義することができる。ロボットの姿勢安定制御は、ロボットの転倒を回避する上で非常に重要である。何故ならば、転倒は、ロボットが実行中の作業を中断することを意味し、且つ、転倒状態から起き上がって作業を再開するために相当の労力や時間が払われるからである。また、転倒によって、ロボット本体自体、あるいは転倒するロボットと衝突する相手側の物体にも、致命的な損傷を与えてしまう危険があるからである。

- 脚式移動ロボットの姿勢安定制御や歩行時の転倒防止に関する提案の多くは、ZMP (Zero Moment Point) を歩行の安定度判別の規範として用いている。ZMPによる安定度判別規範は、歩行系から路面には重力と慣性力、並びにこれらのモーメントが路面から歩行系への反作用としての床反力並びに床反モーメントとバランスするという「ダランベールの原理」に基づく。力学的推論の帰結として、足底接地点と路面の形成する支持多角形（すなわちZMP安定領域）の辺上あるいはその内側にピッチ軸及びロール軸モーメントがゼロとなる点、すなわち「ZMP」が存在する（例えば、ヴコブラトビッチ (Miomir Vukobratovic') 著「脚式移動ロボット (LEGGED LOCOMOTION ROBOTS)」(加藤一郎外著『歩行ロボットと人工の足』(日刊工業新聞社))を参照のこと)。

- 要約すれば、ZMP規範とは、「歩行のあらゆる瞬間において、ZMPが足部と路面とが形成する支持多角形の内側に存在し、且つ、ロボットが路面に押す方向の力が作用すれば、ロボットが転倒（機体が回転運動）することなく安定に歩行できる」とするものである。

ZMP規範に基づく2足歩行パターン生成によれば、足底着地点をあらかじめ

設定することができ、路面形状に応じた足先の運動学的拘束条件を考慮し易いなどの利点がある。また、ZMPを安定度判別規範とすることは、力ではなく軌道を運動制御上の目標値として扱うことを意味するので、技術的に実現可能性が高まる。

- 5 ところで、従来開発されてきた脚式移動ロボットの移動形態は、いずれかの脚部が常に路面との接触を維持する「歩行」によるものが大半である。通常運用時の脚式移動ロボットにとって、歩行は、機械系・電気系に対して過大な負荷を与えることなく、安全且つ効率的に移動可能な、最適な移動形態と言える。

- 10 一方、脚式移動ロボットがその歩行機能だけでは対応できない状況として、地面からの反力が得られない、無接地状態を包含する場合が考えられる。脚式移動ロボットが地面の存在する重力環境中で動作する場合、長期に亘って無接地状態が連続する状況はないが、短期的・断続的無接地状態が発生する状況は多く存在すると考えられる。例えば、ロボットが空隙部を飛び越える、段上から飛び降りる、移動速度を上げるために走行する、バランス維持のために飛び跳ねて立脚位置を変更するなどである。

- 15 このような脚式移動ロボットの無接地状態におけるバランス制御を扱った研究例はまだ多くないが、例えば松岡清利著「反復跳躍モデル. バイオメカニズム 5」(東京大学出版会、1985年、pp. 4501-4509)、及びマーク・H・レイバート (Marc H. Raibert) 外2名著「3次元単脚ホッピング・マシンを用いたバランスに関する実験 (Experiments In Balance with a 3D one-Legged Hopping Machine)」(ロボット研究に関する国際機関誌(the International Journal of Robotics Research)、1984年、Vol. 3、No. 2, pp. 75-92) などが先駆的研究として著名である。しかしながら、これらは、以下のような理由で、実用的な脚式移動ロボットの制御系として利用されるには至らなかった。

①無質量脚を仮定しているので、機械設計自由度に対する制約が大きい。

②連続跳躍のみを仮定していて、歩行や停止状態との遷移に関するダイナミクス

が十分には検討されていない。

③足先軌道に関し、幾何的拘束条件を課し難い。

- また、長阪憲一郎著「動力学フィルタによる人間型ロボットの全身運動生成」
5 (1999年、東京大学工学部情報工学専攻博士論文)では、ZMP規範の拡張
形として、接地・無接地が混在する場合の脚式移動ロボットの運動パターンの算
出方法について提案されている。しかしながら、同文献では、非線形方程式を解
くために収束演算を用いていることから、計算負荷が高く、オフラインであらか
じめ運動パターンを算出しておかなければならない。すなわち、実時間で歩行・
10 走行・跳躍などの接地期間と無接地期間が混在する運動パターンを生成できるに
は至っていない。

- 歩行制御に関しては、ZMP規範に基づいて運動パターンを算出する方法が今
日の脚式移動ロボットの有力な基礎的制御手段となっている(前述)。ZMPをロ
ボットの機体安定度判別規範に採用する最大のメリットは、足先の幾何的拘束条
15 件の与え易さと、広範な機械モデルへの適用が可能であるなど、その実用性の高
さにある。例えば、動作中にオンボードで安定な運動パターンを生成しながら歩
行可能とする、実時間歩行パターン生成の技術も確立し、柔軟な制御系の構成に
関する報告もある(例えば、本出願人に既に譲渡されている特願2002-28
8745号明細書を参照のこと)。

- 20 一方、走行・跳躍運動などの無接地期間を含む運動に関しては、上述したよう
に、実用的な制御手段は提案されていない状況にある。

- 接地・無接地期間が混在する脚式運動の実用化の障害となる第一の問題として、
機械モデルへの制約が大きい制御方式が大半であるということが挙げられる。特
に、滞空時の脚の運動によるロボットの慣性変動を扱う困難さゆえに脚の質量を
25 無視している方式が多いため(例えば、例えば松岡清利著「反復跳躍モデル、バ
イオメカニズム 5」(東京大学出版会、1985年、pp. 4501-4509)、
並びにマーク・H・レイバート(Marc H. Raibert)外2名著「3次
元単脚ホッピング・マシンを用いたバランスに関する実験(Experiments
In Balance with a 3D one-Legged Hopp

ing Machine)」（ロボット研究に関する国際機関誌（the International Journal of Robotics Research）、1984年、Vol. 3、No. 2、pp. 75-92）を参照のこと）、多くの実用的脚式移動ロボットに適用することができない。

- 5 今日の間人形ロボットは、片脚に6自由度以上の自由度を有するものが標準的である。このように脚部に多自由度を有する脚式移動ロボットでは、多くのアクチュエータを搭載しなければならないが、そのすべてを基体（腰部など機体の重心付近の部位）に搭載することは困難であり、脚部内に相当数のアクチュエータが組み込まれている（ワイヤ伝導による不用意なトルク干渉を起こさないためと
- 10 の理由もあるだろう）。また、そもそも脚部は脚式移動ロボットの全重量を支持する部位であり、機械的強度の確保が必須であるため、構造材が相当量の重量を有している場合が多い。

- 以上のような理由から、脚の質量は増大し、力学モデル上無視できないレベルとなるのが一般的である。このような脚質量を有する脚式移動ロボットに対して
- 15 従来手法を適用することは困難であろう。

また、第2の問題として、歩行・停止状態との遷移に対応可能な走行・跳躍制御アルゴリズムが少ないという点が挙げられる。

- 既に述べたように、脚式移動ロボットが常時走行・跳躍を行なっているケースは稀であり、多くの状況下では停止又は歩行状態にあり、必要に応じて走行・跳躍を実行した後、再度、歩行・停止状態に復帰すると考えられる。場合によっては、接地状態から咄嗟に跳躍を行なう状況もあれば、徐々に歩行を加速して走行に至り、滑らかに減速して再度歩行・停止に至る状況もある。
- 20

- このような多様且つ不規則な接地運動・無接地運動間の遷移に対しても、動力学的バランスを適切に維持しながらシームレスに運動状態の変更が可能なより一般的な制御方式が切望されている。
- 25

また、第3の問題として、幾何的な拘束条件を付加できない走行・跳躍制御方式が大半であるという点が挙げられる。

特に、脚部エンド・ポイントの慣性座標系内位置・姿勢軌道に幾何的拘束を課したい状況は多く存在するが、接地点が機体のバランス維持のために操作される

方式が多い。脚式移動ロボットを定量的に制御するには、足先の軌道を明示的に指定できることが望ましい。例えば、走行時の歩幅・周期、跳躍時の足底高さなどのパラメータはユーザ・プログラムより指定可能とするのが望ましい。階段を駆け登る、あるいは連続的な複数の空隙を飛び越えるなどの要求が発生した場合

5 には、足先の軌道をバランス維持のために操作するのは望ましくない。

ZMP規範に基づく歩行パターン生成による歩行制御方式は、このような運動学的拘束を課すことができることが大きな実用上の利点である。これは無接地期が存在する運動に拡張した場合にも変わらない要求である。

また、第4の問題として、非同期な外部要求を満足するように実時間で運動パ

10 ターンの変更が可能な方式が切望されていることが挙げられる。

脚式移動ロボットが実環境中を自由に移動可能とするためには、さまざまなタイミングで入力される歩幅・ステップ周期・旋回角・足上げ高さなどの下肢の運動変化要求や、上体の運動変化要求を満足するよう、力学的バランス平衡を保ったまま、即応的に全身運動を再計画する機能が必要である。あらかじめオフラインで運動パターンを作成するのでは、このような要求に応えることはできない。

15 また、バランスの維持のみを行なう制御系では、このような外部要求を満足することは困難であろう。

発明の開示

20

本発明の目的は、歩行などの接地期間のみからなる運動以外に、走行や跳躍などの接地期間と無接地期間とが混在する、優れたロボット装置、ロボット装置の運動制御装置並びに運動制御方法を提供することにある。

本発明のさらなる目的は、歩行・停止状態と走行・跳躍との遷移に対応し、不規則な接地運動・無接地運動間の遷移に対しても動力的バランスを適切に維持しながらシームレスに運動状態を変更することができる、優れたロボット装置、

25 ロボット装置の運動制御装置並びに運動制御方法を提供することにある。

本発明のさらなる目的は、接地運動・無接地運動間を遷移する安定な運動パターンを実時間で生成することができる、優れたロボット装置、ロボット装置の運

動制御装置並びに運動制御方法を提供することにある。

本発明は、上記課題を参酌してなされたものであり、移動手段を有するロボット装置であって、

- 5 前記移動手段と床面が接地する際に、前記床面に接地する前記移動手段の複数の接地部位が形成する支持多角形内のある点回りの水平軸回りモーメントがゼロ又はゼロ近傍となり、且つ、現在の制御周期における前記ロボット装置の少なくとも重心位置及び速度状態に次の制御周期における重心位置及び速度状態が連続的に接続するように前記ロボット装置の重心水平位置軌道に関する境界条件付き運動方程式の解を算出する重心水平位置軌道決定手段と、
- 10 前記移動手段と床面とが無接地の際に、重力以外に前記ロボット装置に作用する垂直方向並進力がゼロ又はゼロ近傍の大きさとなり、且つ、現在の制御周期における前記ロボット装置の重心垂直位置及び速度状態に、次の制御周期における重心垂直位置及び速度状態が連続的に接続するように前記ロボット装置の重心垂直位置軌道に関する境界条件付き運動方程式の解を算出する重心垂直位置軌道決定手段と、
- 15 前記移動手段と床面とが無接地の際に、前記ロボット装置の重心回りモーメントがゼロ又はゼロ近傍の大きさとなり、且つ、前記重心水平位置軌道決定手段及び前記重心垂直位置軌道決定手段により決定された重心位置を満たすように、次の制御周期における前記ロボット装置の運動状態を決定する運動状態決定手段と、を具備することを特徴とするロボット装置である。
- 20 前記重心水平位置軌道決定手段は、例えば前記移動手段と床面が接地する際に、前記ロボット装置に作用する水平軸回りモーメントと、少なくとも前記ロボット装置の重心位置及び速度状態の時間的連続性に基づいて、前記ロボット装置の重心水平位置軌道を算出する。また、前記重心垂直位置軌道決定手段は、例えば前記移動手段と床面とが無接地の際に、重力以外に前記ロボット装置に作用する垂直方向並進力と、少なくとも前記ロボット装置の重心垂直位置及び速度状態の時間的連続性に基づいて、前記ロボット装置の重心垂直位置軌道を算出する。また、前記運動状態決定手段は、例えば前記移動手段と床面とが無接地の際に、前記ロ
- 25

ロボット装置の重心回りモーメントと、前記重心水平位置軌道決定手段及び前記重心垂直位置軌道決定手段により決定された重心位置を満たすように、前記ロボット装置の運動状態を決定する。

- 5 本発明に係るロボット装置によれば、前記の重心水平位置軌道決定手段、及び前記の重心垂直位置軌道決定手段がそれぞれ重心水平位置軌道及び重心垂直位置軌道に関する境界条件付き運動方程式の解を制御周期毎に算出し、さらに運動状態決定手段が、ロボット装置の重心回りのモーメントを調整しながら、制御周期毎にロボット装置の運動状態を決定するので、ロボット装置の動作を実時間で制御することができる。

- 10 ここで、前記運動状態決定手段は、現在の制御周期における前記ロボット装置の運動状態から算出されるヤコビアンを用いて、ロボット装置に発生するモーメントを調整しながら、次の制御周期における前記ロボット装置の運動状態を決定するようにしてもよい。

- 15 また、前記重心水平位置軌道決定手段は、前記移動手段と床面が接地する際に、前記支持多角形内の点回りの水平軸回りモーメントがゼロ又はゼロ近傍の大きさとなる代わりに、前記ロボット装置のロール軸及びピッチ軸回りのモーメントがゼロとなるZMPが前記支持多角形内に存在するように、前記ロボット装置の重心水平位置軌道に関する境界条件付き運動方程式の解を算出するようにしてもよい。

- 20 また、前記重心水平位置軌道決定手段は、前記移動手段と床面とが無接地の際には、前記水平方向並進力がゼロ又はゼロ近傍の大きさとなる代わりに、水平方向運動量が略一定となるように前記ロボット装置の重心水平位置軌道に関する境界条件付き運動方程式の解を算出するようにしてもよい。

- 25 また、本発明に係るロボット装置は、前記ロボット装置の重心位置及び速度状態を計測する重心位置・速度状態計測手段をさらに備えていてもよい。このような場合、前記重心水平位置軌道決定手段及び前記重心垂直位置軌道決定手段は、前記重心位置・速度状態計測手段によって計測された現在の制御周期における前記ロボット装置の重心位置及び速度状態を、次の制御周期における前記境界条件付き運動方程式の初期境界条件として設定することができる。

また、前記運動状態決定手段は、前記ロボット装置の基体の姿勢角を操作量として前記ロボット装置の運動状態を決定するようにしてもよい。

あるいは、前記運動状態決定手段は、前記ロボット装置の腰関節角を操作量として、前記ロボット装置の運動状態を決定するようにしてもよい。

- 5 また、前記運動状態決定手段は、前記移動手段と床面とが無接地の際に、前記ロボット装置の重心回りモーメントがゼロ又はゼロ近傍の大きさとなる代わりに、重心回り角運動量が一定となるように、次の制御周期における前記ロボット装置の運動状態を決定するようにしてもよい。

- 10 本発明のさらに他の目的、特徴や利点は、後述する本発明の実施形態や添付する図面に基づくより詳細な説明によって明らかになるであろう。

図面の簡単な説明

- 15 図 1 は、本発明の実施に供される脚式移動ロボットの自由度構成を模式的に示した図である。

図 2 は、 $F = f$ 、 $N = n$ なる外力 F ，外モーメント N の組み合わせが存在し得るように運動パターンが発生せんとする力 f 及びモーメント n に拘束条件（動力学的拘束条件）を課す様子を示した図である。

- 20 図 3 は、本発明の一実施形態に係る脚式移動ロボットの制御システムの機能構成を模式的に示した図である。

図 4 は、図 3 に示した制御システムにおいて実行される処理手順を示したフローチャートである。

図 5 は、足底の位置・姿勢軌道の一例を示した図である。

- 25 図 6 は、短期区間が N 区間だけ連なっている様子を示した図である。

図 7 は、短期区間が N 区間連なって構成されているとしたモデルに接地期に属する短期区間と無接地期に属する短期区間が混在している様子を示した図である。

図 8 は、短期区間と無接地期に属する短期区間が混在しているモデルにおける重心位置基本軌道と重心位置参照軌道の関係を示した図である。

図 9 は、重心位置軌道生成部 3 2 において実行される処理の流れを示したフローチャートである。

図 1 0 は、短期区間と無接地期に属する短期区間が混在しているモデルにおける基体姿勢基本軌道と基体姿勢参照軌道との関係を示した図である。

- 5 図 1 1 は、基体姿勢軌道生成部 3 3 において実行される処理手順を示したフローチャートである。

発明を実施するための最良の形態

- 10 本発明は、脚式移動ロボットにおける接地期間と無接地期間が混在するような運動に対して、力学的に安定な運動パターンを実時間で生成可能とする制御方法を提供するものである。本発明に係る制御方法により、脚式移動ロボットは、歩行のみならず、跳躍や走行、並びにこれらの運動が順次発現される状況において、歩幅・周期などの外部要求を満足しながら、力学的に安定な運動パターンを即応
- 15 的に計算して動作することが可能となる。

以下、図面を参照しながら本発明の実施形態について詳解する。

図 1 には、本発明の実施に供される脚式移動ロボットの自由度構成を模式的に示している。

- 20 同図に示すロボットは、基体に四肢が取り付けられ、肩関節ピッチ軸、肩関節ロール軸、上腕ヨー軸、肘関節ピッチ軸、前腕ヨー軸、手首ロール軸、手首ピッチ軸という 7 自由度からなる左右の腕部と、股関節ヨー軸、股関節ロール軸、股関節ピッチ軸、膝ピッチ軸、足首ピッチ軸、足首ロール軸という 6 自由度からなる左右の脚部で構成されている。左右の股関節を繋ぐ骨盤 B 1 が基体リンクに相当し、上体は 3 自由度（ロール、ピッチ、ヨー）の腰部関節を介して基体リンク B 1 に接続され、基体リンク B 1 に二肢の 6 自由度脚部と上体が接続されている。
- 25

これらの各関節自由度は、実際にはアクチュエータ・モータにより実現される。本実施形態では、ギア直結型で且つサーボ制御系をワンチップ化してモータ・ユニットに内蔵したタイプの小型 AC サーボ・アクチュエータを搭載する。なお、

この種のACサーボ・アクチュエータに関しては、例えば本出願人に既に譲渡されている特開2000-299970号公報(特願平11-33386号明細書)に開示されている。

機体の骨盤部には、加速度センサA1及びジャイロG1が搭載されている。また、
5 左右の足底四隅には、足底面垂直方向の床反力を検出する1軸ロードセル(F1～F8)と、床面までの距離を測定する赤外線測距センサ(D1～D8)がそれぞれ4つ取り付けられている。また、左右の足底中央部には、それぞれ加速度センサ(A2, A3)及びジャイロ(G2, G3)が取り付けられている。

ここで、ロボットの質量を m とし、慣性座標系内での重心位置を $x = (x, y, z)^T$ とし、
10 ロボットが外界から受ける力及びモーメントをそれぞれ F 及び N とする。

ロボットの運動パターンは、闇雲に作成しても計画通り動作することではなく、
運動パターンが発生せんとする力 $f = (f_x, f_y, f_z)^T$ 及びモーメント $n = (n_x, n_y, n_z)^T$ が実際の環境から反作用として得られるように設定されているとき
15 にのみ、計画通り動作することができる。すなわち、 $F = f$ 、 $N = n$ なる外力 F 、外モーメント N の組み合わせが存在し得るように運動パターンが発生せんとする力 f 、及びモーメント n に拘束条件を課さなければならない(図2を参照のこと)。

本明細書では、このような力学的な平衡条件に関する拘束条件のことを「動力学的拘束条件」と呼ぶ。一方、足先軌道のように明示的に位置と時間の拘束を与える
20 条件のことを「幾何学的拘束条件」と呼ぶ。

例えば、ロボットが平面に接地している場合の動力学的拘束条件は「ZMPが接地多角形内にあること」と等価であることが知られている(前述)。すなわち、慣性座標系の接地多角形内に任意の点 $p = (p_x, p_y, p_z)^T$ を考え、この点 p 回りに発生するモーメントを $M = (M_x, M_y, M_z)^T$ とすると、下式を満たすことが
25 動力学的拘束条件を与える。

$$M_x = M_y = 0 \quad (1)$$

上式で表される動力学的拘束条件は、後述するように、運動パターンが発生せんとする力 f 及びモーメント n を用いた表記に変換することができる。

一方、無接地状態においては、環境より一切の外力及び外モーメントとも得る

ことができないので、以下の2式が動力的拘束条件を与える。

$$f = 0 \quad (2)$$

$$n = 0 \quad (3)$$

- 本実施形態では、このような考えに基づき、接地期間に関しては上式(1)が
- 5 成立し、無接地期間においては上式(2)及び(3)が成立するような全身の運動パターンを実時間で算出するアルゴリズムを構成することで、脚式移動ロボットにおける自在な歩行・走行・跳躍が可能な制御系を実現する。以下、本明細書では、式(1)及び(2)を満足するためにロボットの重心位置を操作するとともに、式(3)を満足するためにロボットの基体(骨盤)姿勢を操作する例について述べる。
- 10

- 図3には、本実施形態に係る脚式移動ロボットの制御システムの機能構成を模式的に示している。同図に示すように、この制御システムは、運動要求入力部3Aと、実時間全身運動生成部3Bと、全身関節駆動部3Cより構成される。実時間全身運動生成部3Bはさらに、足底位置・姿勢軌道生成部31と、重心位置軌道生成部32と、基体姿勢軌道生成部33と、各軌道補間部(より具体的には、上体関節角参照軌道補間部34、基体姿勢参照軌道補間部35、重心位置参照軌道補間部36、足底位置・姿勢参照軌道補間部37)と、質点分布調整部38と、関節角算出部39から構成される。
- 15

- 運動要求入力部3Aは、ユーザ・プログラム(あるいは図示しないその他の手段)により時々刻々と決定される上体(腕関節・腰関節)への運動要求(上体関節角参照軌道)と、基体(骨盤)の姿勢角に関する運動要求(基体姿勢基本軌道)と、重心垂直位置軌道に関する運動要求(重心垂直位置基本軌道)と、歩幅・運動周期・旋回角・滞空時間などの下肢運動に関わるパラメータ(下肢運動パラメータ)を入力し、実時間全身運動生成部3Bに出力する。
- 20

- 25 実時間全身運動生成部3Bは、動力的拘束条件に基づく力学的バランス平衡を維持しつつ、現在の運動状態から滑らかに遷移可能で、ユーザ・プログラムからの上体・下肢運動変更要求を共に満足することのできる、次時刻のロボットの運動状態を決定し、全身の関節角参照値として出力する。

全身関節駆動部3Cは、実時間全身運動生成部3Bから出力される関節角参照

値を実現するよう、全身の関節自由度を構成するアクチュエータ・モータをサーボ・コントローラ（図示しない）により駆動する。

実時間全身運動生成部 3 B 内の足底位置・姿勢軌道生成部 3 1 は、運動要求入力部 3 A より入力された下肢運動に関わるパラメータに基づき、現在の足底位置・姿勢から数歩先までの左右両足底の位置及び姿勢軌道を算出する。

また、重心位置軌道生成部 3 2 は、運動要求入力部 3 A より入力された重心垂直位置基本軌道を最大限に反映しつつ、現在の重心位置軌道に滑らかに接続し、接地期間に関しては動力的拘束条件としての上式（１）が、無接地期間においては動力的拘束条件としての上式（２）が成立するような重心位置軌道を算出する。

また、基体姿勢軌道生成部 3 3 は、運動要求入力部 3 A より入力された基体姿勢基本軌道を最大限に反映しつつ、現在の基体姿勢軌道に滑らかに接続し、上記重心位置軌道に係る接地期並びに無接地期の各期間における動力的拘束条件としての上式（１）及び（２）に加え、無接地期に関して動力的拘束条件としての上式（３）が成立するような基体姿勢角軌道を算出する。

各軌道補間部（上体関節角参照軌道補間部 3 4、基体姿勢参照軌道補間部 3 5、重心位置参照軌道補間部 3 6、並びに足底位置・姿勢参照軌道補間部 3 7）は、それぞれ上述のようにして算出された上体関節角参照軌道、基体姿勢参照軌道、重心位置参照軌道、並びに足底位置・姿勢参照軌道の補間処理を実行し、次時刻の上体関節角、基体姿勢角、重心位置、足底位置・姿勢を算出する、質点分布調整部 3 8 は、これらの上体関節角、基体姿勢角、重心位置、足底位置・姿勢を同時に満足するような全身質点分布状態を調整する。

関節角算出部 3 9 では、質点分布調整部 3 8 で得られた次時刻の基体位置、及び足底位置・姿勢軌道生成部 3 1 より得られる次時刻の足底位置姿勢を実現するように脚部の関節角を決定する。これは、両者の相対位置姿勢を求めた後、例えば、周知の逆キネマティクス計算によって実行することができる。

図 4 には、図 3 に示した制御システムにおいて実行される処理手順をフローチャートの形式で示している。

制御系は、処理開始後、運動要求入力部 3 A において、上体関節角、基体姿勢、

重心垂直位置、下肢運動への運動要求を入力する（ステップS 1）。

次いで、足底位置・姿勢軌道生成部 3 1、重心位置軌道生成部 3 2、及び基体姿勢軌道生成部 3 3において、足底位置・姿勢軌道、重心位置軌道、基体姿勢軌道をそれぞれ生成する（ステップS 2, S 3, S 4）。

- 5 次いで、上記の各軌道補間部（上体関節角参照軌道補間部 3 4、基体姿勢参照軌道補間部 3 5、重心位置参照軌道補間部 3 6、足底位置・姿勢参照軌道補間部 3 7）において、次時刻の上体関節角、基体姿勢角、重心位置、並びに足底位置・姿勢をそれぞれ算出する（ステップS 5）。

- さらに、質点分布調整部 3 8にて全身関節角を算出し（ステップS 6）、最後に、
10 全身関節駆動部 3 Cにおいて、各関節をサーボ・コントローラにより駆動する（ステップS 7）。

以上の処理が図 3 に示した本制御システムの 1 周期に関する処理である。上記の処理が終了した後は再度ステップS 1 の実行に戻る処理を所定の制御周期 Δt （例えば 10 ミリ秒）毎に実行する。

- 15 次に、実時間全身運動生成部 3 B 内における機能構成や動作について詳解する。

実時間全身運動生成部 3 B 内の足底位置・姿勢軌道生成部 3 1 は、運動要求入力部 3 A より入力された、歩幅・運動周期（歩行周期、走行周期、跳躍周期など）・旋回角・足上げ高さ・滞空時間などの下肢運動に関するパラメータに応じて現在の足底位置・姿勢状態から数歩先までの左右両足底の位置及び姿勢軌道を計画する。

- 20 図 5 には足底の位置・姿勢軌道の一例を示している。同図に示すように、足底の位置・姿勢軌道は、位置に関しては座標位置（ x, y, z ）で、姿勢に関してはオイラー（Euler）角（ α, β, γ ）などを用いて表現し、上述した下肢運動パラメータに適合するよう、左右足底について各パラメータ毎に多項式補間などを用いて時系列を生成することで構成される。

- 25 例えば、左足底位置姿勢軌道に関しては、左足底位置姿勢を（ $x_L, y_L, z_L, \alpha_L, \beta_L, \gamma_L$ ）、現在の左足底位置姿勢を（ $x_{L1}, y_{L1}, z_{L1}, \alpha_{L1}, \beta_{L1}, \gamma_{L1}$ ）とすると、次の着床位置姿勢（ $x_{L2}, y_{L2}, z_{L2}, \alpha_{L2}, \beta_{L2}, \gamma_{L2}$ ）は歩幅・運動周期・旋回角などの下肢運動パラメータにより決定され、その間の左足底位置姿勢軌道は、下式に示すように各位置姿勢毎の補間式によって構成される。

$$\begin{aligned}
x_L &= x_L(t; x_{L1}, x_{L2}) \\
y_L &= y_L(t; y_{L1}, y_{L2}) \\
z_L &= z_L(t; z_{L1}, z_{L2}) \\
\alpha_L &= \alpha_L(t; \alpha_{L1}, \alpha_{L2}) \\
\beta_L &= \beta_L(t; \beta_{L1}, \beta_{L2}) \\
\gamma_L &= \gamma_L(t; \gamma_{L1}, \gamma_{L2})
\end{aligned} \tag{4}$$

補間式には、例えば5次の多項式などを用いることができる。2歩目以降の足底位置姿勢は、1歩目と同一の下肢運動要求が継続するものとして、同様に補間式によって構成する。また、右足底位置姿勢軌道についても同様に構成する。

- 5 重心位置軌道生成部32は、接地期には上式(1)で表される動力学の拘束条件が、無接地期には上式(2)で表される動力学の拘束条件が、それぞれ成立するような重心の水平軌道を算出する。以下では、重心位置軌道生成部32の一構成法として、接地期に課される拘束条件式、及び無接地期に課される拘束条件式の具体的構成法と、両条件を満足する重心位置軌道の算出法について説明する。

- 10 接地期においては、慣性座標系内に任意の点 $p = (p_x, p_y, p_z)^T$ を考え、この点 p 回りに発生するモーメント M を考える。また、重力加速度ベクトルを $-g = (0, 0, -g)^T$ とする。点 p 回りのモーメントの平衡条件より、以下の式が得られる。

$$M = n + (x - p) \times f \tag{5}$$

- 15 また、重心の並進運動方程式より、下式が成立する。

$$m\ddot{x} = f - mg \tag{6}$$

上記の式(5)及び(6)の両式より、座標位置 $x(x, y, z)$ に印加される力 f を消去すると、下式の通りとなる。

$$M = (x - p) \times m(\ddot{x} + g) + n \tag{7}$$

- 20 ここで、点 p をZMPにとると、水平軸モーメントがゼロとなるので、下式が成立する。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ * \end{bmatrix} = (x - p) \times m(\ddot{x} + g) + n \tag{8}$$

一般に、ZMP回りに発生するモーメントは重心運動によるものが支配的である。そこで、上式(8)の右辺第2項を省略し、また、その第1、第2要素について展開すると、下式に示すような重心運動に関するZMP方程式を得ることができる。

$$\begin{aligned} (z-p_z)\ddot{x}-(x-p_x)(\ddot{z}+g) &= 0 \\ (z-p_z)\ddot{y}-(y-p_y)(\ddot{z}+g) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

上式(9)は単純な式をしているものの、 x 及び y に関する変係数の微分方程式であり、解析解を得ることは容易でない。そこで、本実施形態では、一旦、比較的短期間の時間区間 T を考え、この短期区間内において以下の近似が成立すると仮定する。

10

(仮定1) ZMP軌道は加速度を有さない

(仮定2) 重心高さは一定

(仮定3) 外モーメントは一定

15 すると、上記のZMP方程式(9)は、以下に示すような簡潔な常微分方程式となる。

$$m(Z\ddot{X} - gX) = 0 \quad (10)$$

但し、以下の式を満たすものとし、上式(10)は x 成分のみを記したものである。

$$20 \quad X = x - p_x \quad (11)$$

$$Z = z - p_z = \text{const} \quad (12)$$

常微分方程式(10)の一般解は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} x &= p_x + C_1 \exp(\lambda t) + C_2 \exp(-\lambda t) \\ \dot{x} &= \dot{p}_x + \lambda \{C_1 \exp(\lambda t) - C_2 \exp(-\lambda t)\} \end{aligned} \quad (13)$$

但し、 λ は固有値で、下式で表される。

$$25 \quad \lambda = \sqrt{g/Z} \quad (14)$$

上式(13)の境界値を考えると、以下の通りとなる。

$$\begin{aligned}
x(0) &= p_x(0) + C_1 + C_2 \\
\dot{x}(0) &= \dot{p}_x(0) + \lambda(C_1 - C_2) \\
x(T) &= p_x(T) + C_1 \exp(\lambda T) + C_2 \exp(-\lambda T) \\
\dot{x}(T) &= \dot{p}_x(T) + \lambda \{C_1 \exp(\lambda T) - C_2 \exp(-\lambda T)\}
\end{aligned} \tag{15}$$

- 本実施形態では、脚式移動ロボットの一般の運動を、上述した仮定条件（仮定1）、（仮定2）、及び（仮定3）を満足する短期区間が複数連なって構成されているとして、モデル化する。図6には、短期区間がN区間だけ連なっている様子を5 示している。

i 番目の区間 i の時間幅を T_i 、未定係数を C_{1i} 、 C_{2i} 、固有値を λ_i 、区間 i の終端における ZMP 位置を p_{xi} 、重心位置を x_i とすると、上述した境界条件としての上式（15）は一般の区間 i において以下のように表わされる。

$$\begin{aligned}
x_{i-1} &= p_{xi-1} + C_{1i} + C_{2i} \\
\dot{x}_{i-1} &= \dot{p}_{xi-1} + \lambda_i(C_{1i} - C_{2i}) \\
x_i &= p_{xi} + C_{1i} \exp(\lambda_i T_i) + C_{2i} \exp(-\lambda_i T_i) \\
\dot{x}_i &= \dot{p}_{xi} + \lambda_i \{C_{1i} \exp(\lambda_i T_i) - C_{2i} \exp(-\lambda_i T_i)\}
\end{aligned} \tag{16}$$

- 10 一方、無接地期においても同様の短期区間を考えると、この区間において水平方向外力が作用しないことから、重心の水平方向位置（ x ， y ）の運動は以下に示すような単純な運動方程式で支配される。但し、ここでは簡潔のため、 x 方向についてのみ記した。

$$m\ddot{x} = 0 \tag{17}$$

- 15 上式を積分すると、以下の通りとなる。

$$x = C_1 + C_2 t \tag{18}$$

ここで、境界条件を考えると、以下の通りとなる。

$$\begin{aligned}
x(0) &= C_1 \\
\dot{x}(0) &= C_2 \\
x(T) &= C_1 + C_2 T \\
\dot{x}(T) &= C_2
\end{aligned} \tag{19}$$

- 20 接地期において短期区間がN区間連なって構成されているとしてモデル化した（前述）、このような連続区間は、図7に示すように接地期に属する短期区間と、

無接地期に属する短期区間が混在して構成されていてもよい。

短期区間 i が無接地期に属する場合、その境界条件は接地期とは異なるが、上式 (19) に基づいて以下のように導き出される。

$$\begin{aligned} x_{i-1} &= C_{1i} \\ \dot{x}_{i-1} &= C_{2i} \\ x_i &= C_{1i} + C_{2i}T \\ \dot{x}_i &= C_{2i} \end{aligned} \quad (20)$$

- 5 接地期と無接地期が混在して運動が構成されている場合、これらの境界条件が位置及び速度に関して連続に接続されるよう、未定係数を決定しなければならない。区間 $i-1$ と区間 i の境界における位置及び速度の連続条件は、隣接する短期区間の種類によって以下の通り場合分けされる。

(1) 区間 $i-1$ が接地期で、区間 i が接地期の場合

- 10 上記の式 (16) より、区間 $i-1$ から見た x_i 及びその速度成分 dx_i/dt が区間 i から見た値に等しくなるための条件は、以下の通りである。

$$C_{1i} + C_{2i} = C_{1i-1} \exp(\lambda_{i-1}T_{i-1}) + C_{2i-1} \exp(-\lambda_{i-1}T_{i-1}) \quad (21)$$

$$\frac{P_{xi} - P_{xi-1}}{T_i} + \lambda_i(C_{1i} - C_{2i}) \quad (22)$$

$$= \frac{P_{xi-1} - P_{xi-2}}{T_{i-1}} + \lambda_{i-1} \{C_{1i-1} \exp(\lambda_{i-1}T_{i-1}) - C_{2i-1} \exp(-\lambda_{i-1}T_{i-1})\}$$

(2) 区間 $i-1$ が無接地期で、区間 i が接地期の場合

- 15 上記の式 (16) 及び式 (20) より、区間 $i-1$ から見た x_i 及びその速度成分 dx_i/dt が区間 i から見た値に等しくなるための条件は、以下の通りである。

$$P_{xi-1} + C_{1i} + C_{2i} = C_{1i-1} + C_{2i-1}T_{i-1} \quad (23)$$

$$\frac{P_{xi} - P_{xi-1}}{T_i} + \lambda_i(C_{1i} - C_{2i}) = C_{2i-1} \quad (24)$$

(3) 区間 $i-1$ が接地期で、区間 i が無接地期の場合

- 20 上記の式 (16) 及び式 (20) より、区間 $i-1$ から見た x_i 及びその速度成分 dx_i/dt が区間 i から見た値に等しくなるための条件は、以下の通りである。

$$C_{1i} = P_{xi-1} + C_{1i-1} \exp(\lambda_{i-1}T_{i-1}) + C_{2i-1} \exp(-\lambda_{i-1}T_{i-1}) \quad (25)$$

$$C_{2i} = \frac{P_{xi-1} - P_{xi-2}}{T_{i-1}} + \lambda_{i-1} \{C_{1i-1} \exp(\lambda_{i-1} T_{i-1}) - C_{2i-1} \exp(-\lambda_{i-1} T_{i-1})\}, \quad (26)$$

(4) 区間 $i-1$ が無接地期で、区間 i が無接地期の場合

上記の式 (20) より、区間 $i-1$ から見た x_i 及びその速度成分 dx_i/dt が区間 i から見た値に等しくなるための条件は、以下の通りである。

$$5 \quad C_{1i} = C_{1i-1} + C_{2i-1} T_{i-1} \quad (27)$$

$$C_{2i} = C_{2i-1} \quad (28)$$

以上の短期区間境界における位置及び速度の連続条件は、 $i = 2 \dots N$ の各短期区間境界において成立する。また、運動区間全体の始端においても、与えられた重心位置及びその速度を実現するように境界条件が課されるが、無接地区間と接地区間の混在状況を許容する本方式の場合、区間 0 が無接地期又は接地期のいずれであるかに応じて、以下のように異なる境界条件が課される。

(1) 区間 0 が接地期の場合

上記の式 (16) より、区間 0 の始端について、

$$15 \quad C_{1_1} + C_{2_1} + p_{x0} = \bar{x}_0 \quad (29)$$

$$\frac{P_{x1} - P_{x0}}{T_1} + \lambda_1 (C_{1_1} - C_{2_1}) = \dot{\bar{x}}_0 \quad (30)$$

(2) 区間 0 が無接地期の場合

上記の式 (20) より、区間 0 の始端について、

$$C_{1_1} = \bar{x}_0 \quad (31)$$

$$20 \quad C_{2_1} = \dot{\bar{x}}_0 \quad (32)$$

同様に、区間 N の終点においても、運動期間全体の終端条件として、与えられた重心位置及びその速度を実現するように境界条件が課されるが、区間 N が無接地期又は接地期のいずれであるかに応じて、以下のように異なる境界条件が課される。

25

(1) 区間 N が接地期の場合

上記の式 (16) より、区間 N の終端について

$$p_{x_N} + C_{1_N} \exp(\lambda_N T_N) + C_{2_N} \exp(-\lambda_N T_N) = \bar{x}_N \quad (3.3)$$

$$\frac{p_{x_N} - p_{x_{N-1}}}{T_N} + \lambda_N \{C_{1_N} \exp(\lambda_N T_N) - C_{2_N} \exp(-\lambda_N T_N)\} = \dot{x}_N \quad (3.4)$$

(2) 区間Nが接地期の場合

上記の式(2.0)より、区間Nの終端について

$$5 \quad C_{1_N} + C_{2_N} T_N = \bar{x}_N \quad (3.5)$$

$$C_{2_N} = \dot{x}_N \quad (3.6)$$

- 始端条件の重心位置及びその速度には、現在の運動状態に滑らかに接続する重心位置軌道を得るため、現在の重心位置及び速度を代入する。また、終端条件の重心位置には、運動終端における両足底位置を基に、両足底の中心位置などを設定する。終端条件の重心の速度には、重心位置にて重心が静止するとの条件を仮定し、ゼロを代入するなどの設定を行なう。これにより、運動方程式の解に対し、ある時間後に重心が両足底中心の直上に到達するような拘束が課せられる。

- 実時間運動パターン生成においては、比較的短い周期で(例えば制御周期毎に)運動パターンを再計画する処理を繰り返すため、各周期毎に、次の再計画までの微小時間内での安定運動状態を確保することができれば十分である。したがって、
15 現時刻から十分離れた終端時刻における終端到達条件が上述のように近似的に与えられていても、実用上十分な精度を持つ解を得ることができる。

短期区間の境界は、例えば両脚支持期と単脚支持期の境界、接地期と無接地期の境界などに設定すればよい。

- 20 N個の短期区間が連続してなる区間の境界では、上記の式(2.1)～(3.6)により $2N + 2$ 個の拘束条件が与えられる。変数に関しては、未定係数 C_{1i} , C_{2i} ($i = 1 \dots N$) 以外の変数の設定の仕方としては多くの方法が考えられるが、本実施形態では p_{xi} ($i = 1 \dots N$) を変数に加える。接地区間が少なくとも1つ存在すれば、ZMP位置 p_{xi} は2つ以上存在するので、変数の数は $2N + 2$ 個以上
25 となり、解を得ることができる。

一般には、連続する区間には接地区間の数が2以上存在し、変数の数が過剰となるため、最適化問題として取り扱う。例えば、上記の式(2.1)～(3.6)で

与えられる等式拘束条件下にて、接地区間境界におけるZMP位置 p_{xi} と安定領域中心（接地多角形重心）の差分（下式）を最小化する等式制約条件付2次計画問題として扱うことで、これらの未知変数を一意に定めることができる。

$$\min \sum (p_{xi} - \bar{p}_{xi})^2 \quad (37)$$

- 5 あるいは、接地区間境界の特定2ノード p_{xj} , p_{xk} ($j, k \in [0, N]$) 以外のZMP位置は接地多角形重心位置に固定とし、 p_{xj} , p_{xk} のみを変数に設定して、上記の式(21)～(36)を $2N+2$ 元連立1次方程式として解くように構成しても良い。未知変数が定まれば、接地区間に関しては上式(13)を用いて、無接地区間に関しては上式(18)を用いて、計画した運動期間内の任意の時刻
- 10 における重心水平位置を算出することができる。

以上で重心水平位置軌道は得られたことになる。さらに、重心垂直位置軌道に関しても力学的拘束条件が課せられ、これを満足するように軌道を生成しなければならない。重心垂直方向運動に関しては、接地期においては、 $f_z > 0$ を満足している限り、特に力学的拘束を受けない。一方、無接地期には、 $f_z = 0$ なる力学的拘束が課せられる。すなわち、上式(6)で $f_z = 0$ とすると、そのZ成分は、

$$15 \quad m\ddot{z} = -mg \quad (38)$$

上式を積分すると、以下ようになる。

$$z = -\frac{1}{2}gt^2 + K_1t + K_2 \quad (39)$$

- 滞空時間が T 、離床時の重心垂直位置 z_1 、着床時の重心垂直位置 z_2 となるように未定係数を定めると、ロボット重心垂直位置軌道は、下式に示す自由落下曲線として得られる。
- 20

$$z = -\frac{1}{2}gt^2 + \left(\frac{z_2 - z_1}{T} + \frac{1}{2}gT \right)t + z_1 \quad (40)$$

$$\dot{z} = -gt + \left(\frac{z_2 - z_1}{T} + \frac{1}{2}gT \right) \quad (41)$$

- 離床時の重心垂直位置 z_1 及び着床時の重心垂直位置 z_2 は、運動要求入力部3
- 25 Aより入力される、重心垂直位置基本軌道における無接地期の始端及び終端における値を抽出して用いる。

ここで、ユーザ・プログラムより入力される重心垂直位置軌道のことを「基本軌道」と呼称しているのは、上述の動力的拘束条件を満足すべく修正を施されるため、最終的な重心垂直位置参照軌道は異なるものとなるからである。いわば、基本軌道は、あらかじめユーザが設定する概略の軌道とみなすことができる。以下、本明細書中では、基本軌道という用語は、「最大限反映されるが動力的拘束条件を満たすべく修正を施され得る軌道」という意味で用いる。

無接地期における重心垂直位置軌道は、各無接地期間毎に、上式（４０）に従うように設定すればよい。一方、接地期における重心垂直位置軌道に関して動力的拘束条件は特に課されないものの、接地期が無接地期に隣接する場合は、無接地期との境界において、式（４０）と滑らかに接続されるように接地期の重心垂直位置基本軌道の修正を行なわなければならない。すなわち、離床時の重心垂直運動状態は、式（４０）及び式（４１）にて $t=0$ とした以下に示す値となる。

$$z = z_1, \dot{z} = \dot{z}_1 = \left(\frac{z_2 - z_1}{T} + \frac{1}{2} g T \right) \quad (42)$$

このため、これに滑らかに接続するように、無接地期の直前に隣接する接地期の重心垂直位置基本軌道を修正しなければならない。図８中の区間 $i-1$ の接地期はこのようなケースに該当する。

図示の区間 $i-1$ は特に無接地区間に挟まれているケースであり、区間 i との境界（終端）のみならず、区間 $i-2$ の境界（始端）に関しても、上式（４２）で与えられる境界条件を満足する曲線軌道を設定しなければならない。

接地区間の重心垂直位置軌道には、例えば多項式補間などを用いて、このような始端及び終端条件を満足するような曲線軌道を設定することができる。あるいは、必要に応じて、下肢運動パラメータ内に着床・離床時の重心沈み込み深さ Δz を含め、最小値が基本軌道より Δz 以上沈み込まないように曲線を設定したり、変曲点を含まない特殊な曲線で補間するようにしたり、バネ・ダンパ系の応答曲線で構成したりするようにしてもよい。

同様に、着床時の重心垂直運動状態は、上式（４０）及び（４１）にて $t=T$ とした以下に示す値となる。

$$z = z_2, \dot{z} = \dot{z}_2 = \left(\frac{z_2 - z_1}{T} - \frac{1}{2} g T \right) \quad (43)$$

このため、これに滑らかに接続するように、無接地期の直後に隣接する接地期の重心垂直位置基本軌道を修正しなければならない。図8中の区間 $i+1$ はこのようなケースに該当する。

- 5 図示の区間 $i+1$ は区間 $i-1$ の場合と異なり、他端が接地区間 $i+2$ に接続されるケースである。このような場合、区間 i との境界（始端）は上式（43）で与えられる境界条件を満足するように、区間 $i+2$ との境界（終端）は重心垂直位置基本軌道の位置及び速度に連続となるように区間 i の重心垂直位置軌道を設定すればよい。
- 10 無接地期直前の接地期と同様、例えば多項式補間などを用いて、このような始端及び終端条件を満足するような曲線軌道を設定することができる。あるいは、必要に応じて、下肢運動パラメータ内に着床・離床時の重心沈み込み深さ Δz を含め、最小値が基本軌道より Δz 以上沈み込まないように曲線を設定したり、不用意な振動を排除すべく、変曲点を含まない特殊な曲線で補間するようにしたり、
- 15 バネ・ダンパ系の応答曲線で構成したりするようにしてもよい。

- 無接地期に隣接しない接地期の重心垂直位置軌道に関しては、重心垂直位置基本軌道をそのまま参照軌道として設定すればよい。また、無接地期に隣接する接地期の重心垂直位置軌道についても、必ずしも上述したような接地期全体の軌道を基本軌道から修正するのではなく、離床又は着床の直前又は直後の一部の時間
- 20 など、部分的に軌道を修正するように構成してもよい。

- 以上のようにして、重心位置軌道生成部32は、接地期における動学的拘束条件としての式（1）と、無接地期における動学的拘束条件としての式（2）をともに満たすように重心位置軌道を生成することができる。図9には、重心位置軌道生成部32において実行される処理の流れをフローチャートの形式で示している。
- 25

まず、ZMP基本ノード生成処理において、足底位置・姿勢軌道生成部31より得られた足底位置及び姿勢参照軌道に基づいて、ZMP軌道が安定領域中心（接地多角形重心）付近を通過するような、各短期区間境界のZMP基本位置の配列

を作成する（ステップS11）。

- この基本ZMP位置は、後続の重心水平位置軌道算出（ステップS14）において修正が施されるが、最大限実現すべく反映される。ここで、接地多角形外を通過するような基本ZMP軌道、又は安定領域中心から大きく逸脱するような基本ZMP軌道が設定されると、後続の重心水平位置軌道算出処理（ステップS14）において修正が施された際に、ZMPが接地多角形外となり、力学的拘束条件が満足されない事態となる可能性は否めない。多くの場合、このようなケースは生じないが、より頑強なシステムを志向するならば、接地多角形外に逸脱したZMP軌道が得られた場合に、基本ZMP位置を自律修正したり、下肢運動パラメータの自律変更などを実行したりする処理を追加してもよい。

次いで、短期区間境界における重心位置軌道の連続条件を設定する（ステップS12）。すなわち、上式（21）～（28）に基づいて、等式制約条件をマトリクスに設定する。上述したように、連続条件の拘束式は、隣接する区間が接地区間又は無接地区間のいずれであるかに応じて相違する。

- 次いで、考慮している運動区間の始端及び終端における重心水平位置軌道境界条件をマトリクスに設定する（ステップS13）。始端境界条件は上式（29）～（32）、終端境界条件は上式（33）～（36）によってそれぞれ与えられるが、短期区間境界の連続条件と同様、区間0及び区間Nがそれぞれ接地区間なのか無接地区間なのかに応じて拘束条件式は相違する。
- 次いで、ステップS12及びS13で設定した等式拘束条件付2次計画問題[数37]を解き、未定係数 C_{1i} 、 C_{2i} （ $i=1..N$ ）及びZMP位置 p_{xi} （ $i=1..N$ ）を決定する。

- このような処理により、接地区間に関しては上式（13）を、無接地区間に関しては上式（18）を用いることで、任意の時刻における重心水平位置及び速度を算出可能な状態となる。すなわち、任意時刻の重心水平位置軌道が得られたことになる。

次いで、無接地期の重心垂直位置軌道を算出する（ステップS15）。すなわち、ユーザ・プログラムにより与えられる重心垂直位置基本軌道を基に、上式（40）で表される2次方程式の係数決定処理を行なう。このような処理により、無接地

期内の任意の時刻（境界を含む）における重心垂直位置及び速度が算出可能な状態となる。

- さらに、短期区間境界における重心垂直位置及び速度を算出する（ステップ S 16）。無接地期境界における重心垂直位置及び速度は、上式（42）及び上式（43）を用いて算出する。それ以外の境界における重心垂直位置・速度は、ユーザ・プログラムにより与えられる重心垂直位置基本軌道の値をそのまま用いることができる。

最後に、接地区間の重心垂直位置軌道を修正し、動力的拘束条件を考慮した重心垂直位置軌道、ひいては重心位置軌道を完成する（ステップ S 17）。

- 10 無接地期間と隣接している接地区間に関しては、ステップ S 16 で算出した境界条件を満足するよう、多項式などを用いて適切な曲線で重心垂直位置軌道を構成する。また、無接地期間と隣接しない接地区間に関しては、ユーザ・プログラムにより与えられる重心垂直位置基本軌道をそのまま重心垂直位置軌道として用いるように構成する。
- 15 上述したような処理の結果、無接地期の重心垂直位置軌道はステップ S 15 により、接地期の重心垂直位置軌道はステップ S 17 によりそれぞれ得られ、全時刻における重心垂直位置軌道が得られたことになる。

以上の説明から判るように、力学的拘束条件としての式（1）又は（2）を満足する重心位置軌道は得られたが、さらに無接地期における残る動力的拘束条件としての式（3）は別途運動計画に反映しなければならない。

一般に、重心回りの角運動量 L と外モーメント n の間には、以下の関係が成り立つ。

$$\frac{d}{dt}L = n \quad (44)$$

- 無接地期においては、上式（3）に示した力学的拘束条件が課されるが、これを上記の式（44）に代入し積分することで、以下に示す角運動量保存則と等価であることが分かる。

$$L = \text{const} = \bar{L} \quad (45)$$

無接地期の運動は、足底位置・姿勢軌道生成部 31 の出力する足底位置・姿勢

軌道、重心位置軌道生成部 3 2 の出力する重心位置軌道に関する拘束に加え、上記の式 (4 5) に示される角運動量に関する拘束を満足するように計画しなければならない。以下では、角運動量に関する拘束を満足する運動の計画法について詳解する。

- 5 ロボットの状態は、一般に、基体（骨盤）の位置及び姿勢と、全関節角で表すことができる。すなわち、基体の位置を $p_b = (p_{bx}, p_{by}, p_{bz})^T$ 、基体の姿勢（オイラー角）を $\alpha_b = (\alpha_{bx}, \alpha_{by}, \alpha_{bz})^T$ 、左足関節角を $\theta_L = (\theta_{L1}, \theta_{L2}, \theta_{L3}, \theta_{L4}, \theta_{L5}, \theta_{L6})^T$ 、右足関節角を $\theta_R = (\theta_{R1}, \theta_{R2}, \theta_{R3}, \theta_{R4}, \theta_{R5}, \theta_{R6})^T$ 、上体関節角を $\theta_U = (\theta_{U1}, \dots, \theta_{UN})$ とすると、ロボットの状態変数 q は、これらを並べて下式に示すようなベクトルとして定義することができる。ここで、ロボットの
- 10 状態変数 q の次元を N_q とする。

$$q = \begin{bmatrix} p_b \\ \alpha_b \\ \theta_L \\ \theta_R \\ \theta_U \end{bmatrix} \quad (4 6)$$

- すべてのリンクにインデックスを付し、インデックス番号が i となるリンクをリンク i と表記する。ロボット状態変数 q の一般化速度と、リンク i の角速度、並進速度、ロボット全体の重心速度、並びに重心回りの角運動量との関係は、それぞれ式 (4 7)、(4 8)、(4 9)、(5 0) に示すように、ヤコビアン J を用いて記述できる。
- 15

$$\dot{\alpha}_i = J_{\alpha_i} \dot{q} \quad (4 7)$$

$$\dot{p}_i = J_{p_i} \dot{q} \quad (4 8)$$

$$20 \quad \dot{x} = J_x \dot{q} \quad (4 9)$$

$$L = J_L \dot{q} \quad (5 0)$$

- ここで、上記のヤコビアン J はいずれも $3 \times N_q$ の行列であり、一般に現在のロボットの状態 q の関数として解析的に求めることができる。現在の状態 q を既知とすると、これらの式を用いて、上記の重心位置軌道、足底位置・姿勢軌道、角
- 25 運動量に関する拘束条件は、ロボットの状態の一般化速度に関する拘束条件とし

て、以下のように記述することができる。但し、左足底リンクのインデックスを i_L とし、右足底リンクのインデックスを i_R とする。

(1) 足先姿勢に関する拘束条件

- 5 上式 (4 7) において、足底リンクの角速度が、足底位置・姿勢軌道生成部 3 1 が生成した足底軌道から算出した左右それぞれの足のオイラー角速度と等しくなければならないことから、

$$\dot{\alpha}_{i_L} = J_{\omega_{i_L}} \dot{q} = \bar{\alpha}_{i_L} \quad (5 1)$$

$$\dot{\alpha}_{i_R} = J_{\omega_{i_R}} \dot{q} = \bar{\alpha}_{i_R} \quad (5 2)$$

- 10 (2) 足先位置に関する拘束条件

上式 (4 8) において、足底リンクの並進速度が、足底位置・姿勢軌道生成部 3 1 が生成した足底軌道から算出した左右それぞれの足の並進速度と等しくなければならないことから、

$$\dot{p}_{i_L} = J_{p_{i_L}} \dot{q} = \bar{p}_{i_L} \quad (5 3)$$

- 15 $\dot{p}_{i_R} = J_{p_{i_R}} \dot{q} = \bar{p}_{i_R} \quad (5 4)$

(3) 重心位置に関する拘束条件

上式 (4 9) において、重心速度が重心位置軌道生成部 3 2 によって生成された重心位置軌道から算出した重心速度に等しくなければならないことから、

$$\dot{x} = J_x \dot{q} = \bar{x} \quad (5 5)$$

- 20 (4) 角運動量に関する拘束条件

上式 (5 0) において、角運動量が一定であるとの条件を課すと、

$$L = J_L \dot{q} = \bar{L} \quad (5 6)$$

- いずれの拘束式も、3 自由度の拘束条件を与えるので、上式 (5 1) から式 (5 6) にて、全部で 18 自由度の拘束条件を課していることになる。ここでは、例
25 として基体 (骨盤) の位置及び姿勢を操作部位として用いることを考えると、ロボットの状態 q の一般化速度のうち、脚部関節角速度 (合計 12 変数) と基体の並進速度 (3 変数) とオイラー角速度 (3 変数) が未知変数、上体関節角軌道は既知となる。したがって、未知変数の数は 18 個となり、拘束式の数と一致し、上式 (5 1) から式 (5 6) を 18 元連立一次方程式として解くことで未知変数

を容易に求めることが可能となる。

なお、式変形を行なうことで、連立方程式の次元はさらに低減させることが可能であるが、これは本発明の主たる目的ではないので、本明細書では説明を省略する。

- 5 以上の説明により、現在の姿勢が既知、足先位置姿勢固定、重心位置固定という条件下で、角運動量が保存するための基体の並進速度、オイラー角速度を算出できたことになる。よって、制御サイクル（時刻 Δt 毎）における基体姿勢 $\alpha_{b,k+1}$ は、上記の連立方程式の解として得られたオイラー角速度を積分して、以下の式によって求めることができる。

$$10 \quad \alpha_{b,k+1} = \alpha_{b,k} + \dot{\alpha}_{b,k} \Delta t \quad (57)$$

以上の説明で、上式（１）及び（２）で表される動力学的拘束条件に加え、無接地期の回転運動に関する力学的拘束条件としての式（３）を満足する基体姿勢軌道を得ることができたことになる。しかしながら、角運動量を適切な値に設定しないと、空中で大きく回転運動を伴うような運動が生成される可能性がある。

- 15 さまざまな角運動量の設定方法が考えられるが、空中で大きく機体全体が回転するような運動を想定しないのであれば、下式に示すように、無接地期に有する角運動量を 0 に設定するのが最も簡単である。

$$\bar{L} = 0 \quad (58)$$

- あるいは、ヨー軸回りにのみ角運動量を有するように、離床時に算出した Z 軸
20 周り慣性モーメント I_z 、旋回角度 Γ 、及び滞空時間 T を用いて、以下に示す式のように設定するなどの方法も実用的である。

$$\bar{L} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_z \Gamma / T \end{bmatrix} \quad (59)$$

- さて、無接地期における基体姿勢軌道は、上述したような処理手順に従って得られる一方、接地期における基体姿勢軌道に関しては、無接地期における基体姿勢軌道に滑らかに接続されるように、接地期の基体姿勢基本軌道の修正を行わなければならない。

すなわち、離床時に相当する、接地期と無接地期の境界においては、基体姿勢

角が基体姿勢角基本軌道の値と一致し、基体姿勢角速度がこの姿勢において、上式(51)～(56)からなる連立方程式を解いて得られる基体姿勢の角速度の値となるように、無接地期の直前に隣接する接地期の基体姿勢軌道を修正しなければならない。

- 5 同様に、着床時に相当する無接地期と接地期の境界においては、基体姿勢角が上式(57)の数値積分で得られた無接地期終端における基体姿勢角の値と一致し、基体姿勢角速度がこの姿勢において上式(51)～(56)からなる連立方程式を解いて得られる基体姿勢の角速度の値となるように、無接地期の直後に隣接する接地期の基体姿勢軌道を修正しなければならない。
- 10 図10には、短期区間と無接地期に属する短期区間が混在しているモデルにおける基体姿勢基本軌道と基体姿勢参照軌道との関係を例示している。同図中の区間*i* - 1はこのようなケースに該当する。但し、図面の簡素化のため、ロール角軌道のみが記されている。

- 区間*i* - 1は始端及び終端がともに無接地区間に接しているケースであり、区
- 15 間*i*との境界(終端)のみならず、区間*i* - 2の境界(始端)に関しても、上述のような境界条件が課される。例えば、スプライン補間などの多項式補間を用いて、このような始端・終端条件を満足するような曲線軌道として、接地期間の基体姿勢軌道を設定することができる。

- 一方、同図中の区間*i* + 1は区間*i* - 1の場合とは異なり、始端が無接地期となる区間*i*に隣接するが他端は接地区間*i* + 2に接続される接地期である。この
- 20 ような場合は、区間*i*との境界(始端)は無接地期の基体姿勢角軌道による境界条件を満足するように、区間*i* + 2との境界(終端)は基体姿勢基本軌道の位置・速度に連続となるように、区間*i*の基体姿勢角軌道を設定しなければならない。この場合も、例えば、多項式補間などを用いて、このような始端・終端条件を満
- 25 足するような曲線軌道を設定することができる。

なお、無接地期に隣接しない接地期の基体姿勢角軌道に関しては、基体姿勢基本軌道をそのまま参照軌道として設定すればよい。また、無接地期に隣接する接地期の基体姿勢角軌道についても、必ずしも上述したように接地期全体の軌道を基本軌道から修正するのではなく、離床・着床の直前・直後の一部の時間など、

部分的に軌道を修正するように構成してもよい。

以上の接地期の基体姿勢角軌道の修正法が重心位置軌道の修正法と異なる点は、時刻に関して逐次的に処理を行わなければならない点である。基体姿勢角軌道に関しては、無接地区間における軌道を上式（５７）に基づく数値積分でしか得ることができず、無接地期終端の境界条件がこの数値積分によって決定されるためである。実際には、無接地期実行中にはこの数値積分のみを実行し、無接地期から接地期に移行する境界にて、隣接する接地期の軌道修正を実行すればよい。

このようにして、基体姿勢軌道生成部３３は、接地期における力学的拘束条件としての式（１）、無接地期における力学的拘束条件としての式（２）に加え、無接地期における力学的拘束条件としての式（３）を満足するような基体姿勢軌道を生成することができる。

図１１には、基体姿勢軌道生成部３３において実行される処理手順をフローチャートの形式で示している。

まず、現時刻が無接地期に属するかどうかの判定を行なう（ステップＳ２１）。

無接地期の場合、ステップＳ２２に進み、足底位置・姿勢軌道生成部３１の出力する足底位置姿勢軌道を用いて、現時刻の足底位置姿勢に関するヤコビアン拘束式（５１）～（５４）を求める。

次いで、重心位置軌道生成部３２の出力する重心位置軌道を用いて、現時刻の重心位置に関するヤコビアン拘束式（５５）を求める（ステップＳ２３）。

次いで、離床前に算出された角運動量を用いて、角運動量ヤコビアン拘束式（５６）を求める（ステップＳ２４）。

次いで、これらの拘束式（５１）～（５６）からなる連立１次方程式を解き、現時刻における基体姿勢角速度を算出する（ステップＳ２５）。

最後に、該基体姿勢角速度を上式（５７）を用いて数値積分することで、無接地期の基体姿勢角軌道を逐次生成することができる（ステップＳ２６）。

一方、ステップＳ２１において接地期と判定された場合は、現時刻が接地期の始端に該当する場合についてのみ処理を行なう（ステップＳ２０）。

接地期の始端に相当する場合は、ステップＳ２７に進み、該接地期が無接地期に隣接した区間であるかどうかを判定する。

無接地期に隣接している接地期である場合は、さらに、直後に隣接する短期区間が無接地期であるかどうかを判定する（ステップS 2 8）。

直後に隣接する短期区間が無接地期である場合は、上式（5 8）あるいは式（5 9）などの規範に基づいて、該無接地期の目標角運動量を算出する（ステップS 2 9）。

次いで、それぞれ該無接地期開始時点（離床時）における、足底位置姿勢ヤコビアン拘束式（5 1）～（5 4）、重心位置ヤコビアン拘束式（5 5）、角運動量ヤコビアン拘束式（5 6）をそれぞれ算出する（ステップS 3 0，S 3 1，S 3 2）。

10 これらのヤコビアン拘束式の算出には、先行するステップS 2 9で得られた角運動量の他、足底位置姿勢軌道生成部3 1が生成した足底位置姿勢軌道、重心位置軌道生成部3 2が生成した重心位置軌道の離床時点での値が用いられる。

次いで、これらのヤコビアン拘束式（5 1）～（5 6）からなる連立1次方程式を解き、離床時の基体姿勢角速度を算出しておく（ステップS 3 3）。この時点
15 で、接地期終端の境界条件が決定されたことになる。

さらに、直前に隣接する短期区間が無接地期であるかどうかを判別する（ステップS 3 4）。

直前に隣接する短期区間が無接地期である場合は、ステップS 2 6の結果として得られた無接地期終端の基体姿勢角速度を、接地期始端の境界条件として抽出
20 することで、接地期両端の境界条件の設定が完了する（ステップS 3 5）。

一方、ステップS 3 4において直前に隣接する短期区間が接地期と判定された場合は、ユーザ・プログラムから与えられる基体姿勢基本軌道の値を接地期始端の境界条件として設定することで、接地期両端の境界条件の設定を完了する（ステップS 3 8）。

25 ところで、ステップS 2 8において、接地期直後の短期区間も接地期であると判別された場合は、ステップS 3 7に進み、接地期終端の境界条件として、運動要求入力部3 Aから与えられる基体姿勢基本軌道の値を設定する。接地期始端の境界条件は、ステップS 2 8において接地期直後の短期区間が無接地期と判定された場合と同様の処理を実行することで、接地期両端の境界条件の設定が完了す

る。

以上の処理によって、接地期が無接地期に隣接している場合の接地期両端の境界条件が設定されたが、ステップS 3 9では、同境界条件を満足するように、接地期の基体姿勢軌道を多項式補間などの曲線を用いて構成する処理を行なう。

- 5 さらに、ステップS 2 7において接地期間が何ら無接地期と隣接しないと判断された場合は、接地期の基体姿勢軌道は、運動要求入力部3 Aから与えられる基体姿勢基本軌道をそのまま用いることができるので、ステップS 3 6において、基体姿勢基本軌道を接地期の基体姿勢軌道として設定して、本処理を完了する。

- 再び図3に戻って、本実施形態に係るロボットの制御システムの機能構成に関する説明を続ける。これまでの説明により、ユーザ・プログラムから与えられる上体関節角参照軌道、基体姿勢参照軌道、重心位置参照軌道、足底位置姿勢参照軌道のすべてが得られることになる。あとは、制御周期毎に各軌道に対して設けられている補間部（上体関節角参照軌道補間部3 4、基体姿勢参照軌道補間部3 5、重心位置参照軌道補間部3 6、足底位置・姿勢参照軌道補間部3 7）においてこれらの軌道を補間することで、各時刻における上体関節角、基体姿勢角、重心位置、並びに足底位置姿勢を算出することができる。但し、無接地期における基体姿勢角軌道に関しては数値積分の形で軌道が与えられるため、基体姿勢参照軌道補間部3 5における補間処理は特に必要ない。

- 20 質点分布調整部3 8では、以上で求められた次時刻の基体姿勢と重心位置を満足するように、全身の質点分布状態を調整する。すなわち、基体姿勢、足底位置姿勢、及び上体関節角を要求値に固定したまま、基体（骨盤）の位置（ x_B , y_B , z_B ）を操作し、機体全体の重心が上記で得られた重心位置となるように、全身質点分布を調整する。このような幾何的拘束条件下において、基体の速度と重心の速度の間には、ヤコビアン J_a とすると、以下の関係が成立する。

25
$$\dot{x} = J_B \dot{x}_B \quad (60)$$

現在のロボットの重心位置 x_k とZMP方程式の求解により得られた次時刻の重心位置 x_{k+1} の間に $dx = x_{k+1} - x_k$ の偏差が存在するとき、基体位置の操作量 dx_B は近似的に以下の式で得ることができる。

$$dx_B = J_B^{-1} dx \quad (61)$$

ここで、重心の算出には、ユーザ・プログラムより入力される上体関節角参照値も反映される。

以上より、現在の基体位置を x_{Bk} とすると、上記で得られた次時刻の基体姿勢と重心位置を実現するため質点分布調整後の基体位置 x_{Bk+1} は以下の式で得ること

5 ことができる。

$$x_{Bk+1} = x_{Bk} + J_B^{-1} dx \quad (62)$$

但し、上式 (62) の結果得られる重心位置と参照重心位置の偏差がなお大きな場合は、式 (62) を繰り返し用いて、偏差が十分小さくなるまで収束演算を実行するようにしてもよい。

- 10 関節角算出部 39 では、質点分布調整部 38 で得られた次時刻の基体位置、及び足底位置・姿勢軌道生成部 31 より得られる次時刻の足底位置姿勢を実現するよう、脚部の関節角を決定する。これは、両者の相対位置姿勢を求めた後、例えば、周知の逆キネマティクス計算によって実行することができる。ここで得られた脚関節角と、ユーザ・プログラムより与えられた上体の参照関節角とを併せて、
- 15 次時刻における全身関節角参照値として出力する。

図 3 に示したようなロボットの制御システムを構成することで、脚式移動ロボットは、歩行のみならず、跳躍や走行、並びにこれらの運動が順次現れる状況において、歩幅や周期などの外部要求を満足しながら、力学的に安定な運動パターンを即応的（又は実時間）に計算しながら動作することが可能となる。

- 20 本明細書に記載した実施形態では、ロボットの状態量として重心位置と基体姿勢角を用いる例を示したが、これを他の状態量を用いるように構成しても良い。例えば、重心位置の代わりに重心に近接した部位（例えば腰部）の位置を用いたり、基体姿勢角の代わりに腰部関節角を用いたりするように構成しても、同様に本発明の効果を得ることができる。あるいは、任意の関節角を状態量として用い
- 25 るように構成して、いわゆる全身協調型の制御システムを構成しても良い。

また、上述した実施形態では全身運動生成処理を制御周期毎に実行するように構成されているが、接地状態が変化する時点（両脚支持・片脚支持・無接地の境界）のみで軌道生成までの処理（図 4 中のステップ S1～S4 に相当）を実行し、軌道補間処理以降の処理（同図中のステップ S5～S7）のみ制御周期毎に実行

するなど、軌道生成処理はより長いサイクルで実行するように構成してもよい。但し、この場合の運動要求反映の即応性は低下する。

また、上述した実施形態では、前回の全身運動生成処理の結果得られた現在時刻の運動状態を、次周期の全身運動生成処理の初期条件として設定することで、

- 5 現在の運動状態に滑らかに接続する運動状態を決定したが、本発明の要旨はこれに限定されるものではない。例えば、骨盤部加速度センサ A 1 及びジャイロ G 1、足底力センサ (F 1 ~ F 8) 及び測距センサ (D 1 ~ D 8) 及び加速度センサ (A 2, A 3)、及びジャイロ (G 2, G 3) などのセンサを用いて実際のロボットの運動状態を計測し、これを初期条件として設定することで、非特許文献 5 に開示
- 10 されているロボットの歩行制御装置と同様に、実状態を反映した全身運動生成処理を実行するように構成することができる。

追補

- 以上、特定の実施例を参照しながら、本発明について詳解してきた。しかしながら、本発明の要旨を逸脱しない範囲で当業者が該実施例の修正や代用を成し得
- 15 ることは自明である。

- 本発明の要旨は、必ずしも「ロボット」と称される製品には限定されない。すなわち、電氣的若しくは磁氣的な作用を用いて人間の動作に似せた運動を行う機械装置であるならば、例えば玩具等のような他の産業分野に属する製品であって
- 20 も、同様に本発明を適用することができる。

要するに、例示という形態で本発明を開示してきたのであり、本明細書の記載内容を限定的に解釈するべきではない。本発明の要旨を判断するためには、冒頭に記載した特許請求の範囲の欄を参酌すべきである。

25 産業上の利用可能性

本発明によれば、歩行・停止状態と走行・跳躍との遷移に対応し、不規則な接地運動・無接地運動間の遷移に対しても動力的バランスを適切に維持しながらシームレスに運動状態を変更することができる、優れた脚式移動ロボットの運動

制御装置及び運動制御方法を提供することができる。

また、本発明によれば、接地運動・無接地運動間を遷移する安定な運動パターンを実時間で生成することができる、優れた脚式移動ロボットの運動制御装置及び運動制御方法を提供することができる。

- 5 第一に、本発明は、機械モデルへの制約事項が少ない点で、無質量脚仮定など（例えば、松岡清利著「反復跳躍モデル、バイオメカニズム 5」（東京大学出版会、1985年、pp. 4501-4509）、やマーク・H・レイバート（Ma
r c H. Ra i b e r t）外2名著「3次元単脚ホッピング・マシンを用いたバ
ランスに関する実験（Experiments In Balance with
10 a 3D one-Legged Hopping Machine）」（ロボット
研究に関する国際機関誌（the International Journal
of Robotics Research）、1984年、Vol. 3、No.
2, pp. 75-92）など）に比べて優位である。これは、本発明によれば、
接地期及び無接地期においても全身の質点分布状態が動力的拘束条件に反映さ
15 れるということに依拠する。今日の一般的な脚式移動ロボットは、脚部内に相当
数のアクチュエータが組み込まれ、脚質量を無視することができない。本発明は、
とりわけ、単一の脚部当たり6自由度以上のアクチュエータが実装されるヒュー
マノイド・ロボットに対しても適用できる、高い汎用性・適用可能性を有してい
る。
- 20 第二に、本発明によれば、接地・無接地が混在する脚式移動ロボットの運動制
御が可能となる。従来の脚式移動ロボットの制御系は歩行に関するものが大半であ
り、走行・跳躍などの無接地期を含むより広範な運動制御系を有しているものは
殆ど見られない。これに対し、本発明によれば、歩行・停止・走行・跳躍が混在
したより一般的な運動を実行することができるので、空隙部を飛び越える、段上
25 から飛び降りる、バランス維持のために飛び跳ねて立脚位置を変更するなど、脚
式移動ロボットの路面踏破能力・バランス維持能力を著しく向上させることがで
きる。

第三に、本発明はZMP安定判別規範（例えば、非特許文献1を参照のこと）
に基づく方法を、無接地期を含むより一般的な運動に拡張し、脚部エンドポイン

トの軌道に幾何的拘束を課すことが容易な構成となっている。例えば、走行時の歩幅・周期、跳躍時の足底高さなどの要求値を、力学的バランスを維持しながら両立することができる。また、階段を駆け上る、視覚情報から得られた連続空隙の幅に応じて足を着床しながら走破するといった、足先軌道への拘束が重要な状況に対応可能となる。これらは、エンドポイントの軌道に幾何的拘束を課すことができない従来の運動制御方式では実現が困難なケースである。

第四に、本発明は実時間で力学的に安定な運動パターンを生成することから、非同期に入力される歩幅・ステップ周期・旋回角・足上げ高さなどの下肢の運動変化要求や、上体の運動変化要求を、力学的バランス平衡を保ったまま満足することができ、柔軟且つ多様な無接地・接地状態混在運動を実現することが可能となる。あらかじめオフラインで運動パターンを作成する方法や、バランス維持のみを行なう従来の制御系では、このような外部要求を満足しながら力学的安定性を維持することは極めて困難である。

請求の範囲

1. 移動手段を有するロボット装置であって、

- 前記移動手段と床面が接地する際に、前記床面に接地する前記移動手段の複数
5 の接地部位が形成する支持多角形内のある点回りの水平軸回りモーメントがゼロ
又はゼロ近傍となり、且つ、現在の制御周期における前記ロボット装置の少なく
とも重心位置及び速度状態に次の制御周期における重心位置及び速度状態が連続
的に接続するように前記ロボット装置の重心水平位置軌道に関する境界条件付き
運動方程式の解を算出する重心水平位置軌道決定手段と、
10 前記移動手段と床面とが無接地の際に、重力以外に前記ロボット装置に作用す
る垂直方向並進力がゼロ又はゼロ近傍の大きさとなり、且つ、現在の制御周期に
おける前記ロボット装置の重心垂直位置及び速度状態に、次の制御周期における
重心垂直位置及び速度状態が連続的に接続するように前記ロボット装置の重心垂
直位置軌道に関する境界条件付き運動方程式の解を算出する重心垂直位置軌道決
15 定手段と、
前記移動手段と床面とが無接地の際に、前記ロボット装置の重心回りモーメン
トがゼロ又はゼロ近傍の大きさとなり、且つ、前記重心水平位置軌道決定手段及
び前記重心垂直位置軌道決定手段により決定された重心位置を満たすように、次
の制御周期における前記ロボット装置の運動状態を決定する運動状態決定手段と、
20 を具備することを特徴とするロボット装置。

2. 前記運動状態決定手段は、現在の制御周期における前記ロボット装置の運動
状態から算出されるヤコビアンを用いて、次の制御周期における前記ロボット装
置の運動状態を決定する、
25 ことを特徴とする請求項 1 に記載のロボット装置。

3. 前記重心水平位置軌道決定手段は、前記移動手段と床面が接地する際に、前
記支持多角形内の点回りの水平軸回りモーメントがゼロ又はゼロ近傍の大きさとな
る代わりに、前記ロボット装置のロール軸及びピッチ軸回りのモーメントがゼ

ロとなるZMPが前記支持多角形内に存在するように、前記ロボット装置の重心水平位置軌道に関する境界条件付き運動方程式の解を算出する、
ことを特徴とする請求項1に記載のロボット装置。

- 5 4. 前記重心水平位置軌道決定手段は、前記移動手段と床面とが無接地の際に、前記水平方向並進力がゼロ又はゼロ近傍の大きさとなる代わりに、水平方向運動量が略一定となるように前記ロボット装置の重心水平位置軌道に関する境界条件付き運動方程式の解を算出する、
ことを特徴とする請求項1に記載のロボット装置。

10

5. 前記ロボット装置の重心位置及び速度状態を計測する重心位置・速度状態計測手段をさらに備え、

前記重心水平位置軌道決定手段及び前記重心垂直位置軌道決定手段は、前記重心位置・速度状態計測手段によって計測された現在の制御周期における前記ロボット装置の重心位置及び速度状態を、次の制御周期における前記境界条件付き運動方程式の初期境界条件として設定する、

15

ことを特徴とする請求項1に記載のロボット装置。

6. 前記運動状態決定手段は、前記ロボット装置の基体の姿勢角を操作量として前記ロボット装置の運動状態を決定する、
ことを特徴とする請求項1に記載のロボット装置。

20

7. 前記運動状態決定手段は、前記ロボット装置の腰関節角を操作量として、前記ロボット装置の運動状態を決定する、

25

ことを特徴とする請求項1に記載のロボット装置。

8. 前記運動状態決定手段は、前記移動手段と床面とが無接地の際に、前記ロボット装置の重心回りモーメントがゼロ又はゼロ近傍の大きさとなる代わりに、重心回り角運動量が一定となるように、次の制御周期における前記ロボット装置の

運動状態を決定する、
ことを特徴とする請求項 1 に記載のロボット装置。

9. 移動手段を有するロボット装置であって、

- 5 前記移動手段と床面が接地する際に、前記ロボット装置に作用する水平軸回りモーメントと、少なくとも前記ロボット装置の重心位置及び速度状態の時間的連続性に基づいて、前記ロボット装置の重心水平位置軌道を算出する重心水平位置軌道決定手段と、

- 10 前記移動手段と床面とが無接地の際に、重力以外に前記ロボット装置に作用する垂直方向並進力と、少なくとも前記ロボット装置の重心垂直位置及び速度状態の時間的連続性に基づいて、前記ロボット装置の重心垂直位置軌道を算出する重心垂直位置軌道決定手段と、

- 15 前記移動手段と床面とが無接地の際に、前記ロボット装置の重心回りモーメントと、前記重心水平位置軌道決定手段及び前記重心垂直位置軌道決定手段により決定された重心位置を満たすように、前記ロボット装置の運動状態を決定する運動状態決定手段と、
を具備することを特徴とするロボット装置。

10. 移動手段を有するロボット装置の運動制御装置であって、

- 20 前記移動手段と床面が接地する際に、前記床面に接地する前記移動手段の複数の接地部位が形成する支持多角形内のある点回りの水平軸回りモーメントがゼロ又はゼロ近傍となり、且つ、現在の制御周期における前記ロボット装置の少なくとも重心位置及び速度状態に次の制御周期における重心位置及び速度状態が連続的に接続するように前記ロボット装置の重心水平位置軌道に関する境界条件付き
25 運動方程式の解を算出する重心水平位置軌道決定手段と、

前記移動手段と床面とが無接地の際に、重力以外に前記ロボット装置に作用する垂直方向並進力がゼロ又はゼロ近傍の大きさとなり、且つ、現在の制御周期における前記ロボット装置の重心垂直位置及び速度状態に、次の制御周期における重心垂直位置及び速度状態が連続的に接続するように前記ロボット装置の重心垂

直位置軌道に関する境界条件付き運動方程式の解を算出する重心垂直位置軌道決定手段と、

- 前記移動手段と床面とが無接地の際に、前記ロボット装置の重心回りモーメントがゼロ又はゼロ近傍の大きさとなり、且つ、前記重心水平位置軌道決定手段及び前記重心垂直位置軌道決定手段により決定された重心位置を満たすように、次の制御周期における前記ロボット装置の運動状態を決定する運動状態決定手段と、を具備することを特徴とするロボット装置の運動制御装置。

1 1. 移動手段を有するロボット装置の運動制御方法であって、

- 10 前記移動手段と床面が接地する際に、前記床面に接地する前記移動手段の複数の接地部位が形成する支持多角形内のある点回りの水平軸回りモーメントがゼロ又はゼロ近傍となり、且つ、現在の制御周期における前記ロボット装置の少なくとも重心位置及び速度状態に次の制御周期における重心位置及び速度状態が連続的に接続するように前記ロボット装置の重心水平位置軌道に関する境界条件付き運動方程式の解を算出する重心水平位置軌道決定ステップと、

- 15 前記移動手段と床面とが無接地の際に、重力以外に前記ロボット装置に作用する垂直方向並進力がゼロ又はゼロ近傍の大きさとなり、且つ、現在の制御周期における前記ロボット装置の重心垂直位置及び速度状態に、次の制御周期における重心垂直位置及び速度状態が連続的に接続するように前記ロボット装置の重心垂直位置軌道に関する境界条件付き運動方程式の解を算出する重心垂直位置軌道決定ステップと、

- 20 前記移動手段と床面とが無接地の際に、前記ロボット装置の重心回りモーメントがゼロ又はゼロ近傍の大きさとなり、且つ、前記重心水平位置軌道決定手段及び前記重心垂直位置軌道決定手段により決定された重心位置を満たすように、次の制御周期における前記ロボット装置の運動状態を決定する運動状態決定ステップと、
- 25 を具備することを特徴とするロボット装置の運動制御方法。

1 2. 前記運動状態決定ステップでは、現在の制御周期における前記ロボット装

置の運動状態から算出されるヤコビアンを用いて、次の制御周期における前記ロボット装置の運動状態を決定する、

ことを特徴とする請求項 1 1 に記載のロボット装置の運動制御方法。

- 5 1 3. 前記重心水平位置軌道決定ステップでは、前記移動手段と床面が接地する際に、前記支持多角形内の点回りの水平軸回りモーメントがゼロ又はゼロ近傍の大きさとなる代わりに、前記ロボット装置のロール軸及びピッチ軸回りのモーメントがゼロとなる ZMP が前記支持多角形内に存在するように、前記ロボット装置の重心水平位置軌道に関する境界条件付き運動方程式の解を算出する、
- 10 ことを特徴とする請求項 1 1 に記載のロボット装置の運動制御方法。

- 1 4. 前記重心水平位置軌道決定ステップでは、前記移動手段と床面とが無接地の際に、前記水平方向並進力がゼロ又はゼロ近傍の大きさとなる代わりに、水平方向運動量が略一定となるように前記ロボット装置の重心水平位置軌道に関する境界条件付き運動方程式の解を算出する、
- 15 ことを特徴とする請求項 1 1 に記載のロボット装置の運動制御方法。

- 1 5. 前記ロボット装置の重心位置及び速度状態を計測する重心位置・速度状態計測ステップをさらに備え、
- 20 前記重心水平位置軌道決定ステップ及び前記重心垂直位置軌道決定ステップでは、前記重心位置・速度状態計測ステップにおいて計測された現在の制御周期における前記ロボット装置の重心位置及び速度状態を、次の制御周期における前記境界条件付き運動方程式の初期境界条件として設定する、
- ことを特徴とする請求項 1 1 に記載のロボット装置の運動制御方法。

25

- 1 6. 前記運動状態決定ステップでは、前記ロボット装置の基体の姿勢角を操作量として前記ロボット装置の運動状態を決定する、
- ことを特徴とする請求項 1 1 に記載のロボット装置の運動制御方法。

17. 前記運動状態決定ステップでは、前記ロボット装置の腰関節角を操作量として、前記ロボット装置の運動状態を決定する、
ことを特徴とする請求項11に記載のロボット装置の運動制御方法。

- 5 18. 前記運動状態決定ステップでは、前記移動手段と床面とが無接地の際に、前記ロボット装置の重心回りモーメントがゼロ又はゼロ近傍の大きさとなる代わりに、重心回り角運動量が一定となるように、次の制御周期における前記ロボット装置の運動状態を決定する、
ことを特徴とする請求項11に記載のロボット装置の運動制御方法。

10

19. 移動手段を有するロボット装置の運動制御方法であって、

前記移動手段と床面が接地する際に、前記ロボット装置に作用する水平軸回りモーメントと、少なくとも前記ロボット装置の重心位置及び速度状態の時間的連続性に基づいて、前記ロボット装置の重心水平位置軌道を算出する重心水平位置軌道決定ステップと、

15

前記移動手段と床面とが無接地の際に、重力以外に前記ロボット装置に作用する垂直方向並進力と、少なくとも前記ロボット装置の重心垂直位置及び速度状態の時間的連続性に基づいて、前記ロボット装置の重心垂直位置軌道を算出する重心垂直位置軌道決定ステップと、

20

前記移動手段と床面とが無接地の際に、前記ロボット装置の重心回りモーメントと、前記重心水平位置軌道決定ステップ及び前記重心垂直位置軌道決定ステップにおいて決定された重心位置を満たすように、前記ロボット装置の運動状態を決定する運動状態決定ステップと、
を具備することを特徴とするロボット装置の運動制御方法。

25

1/9

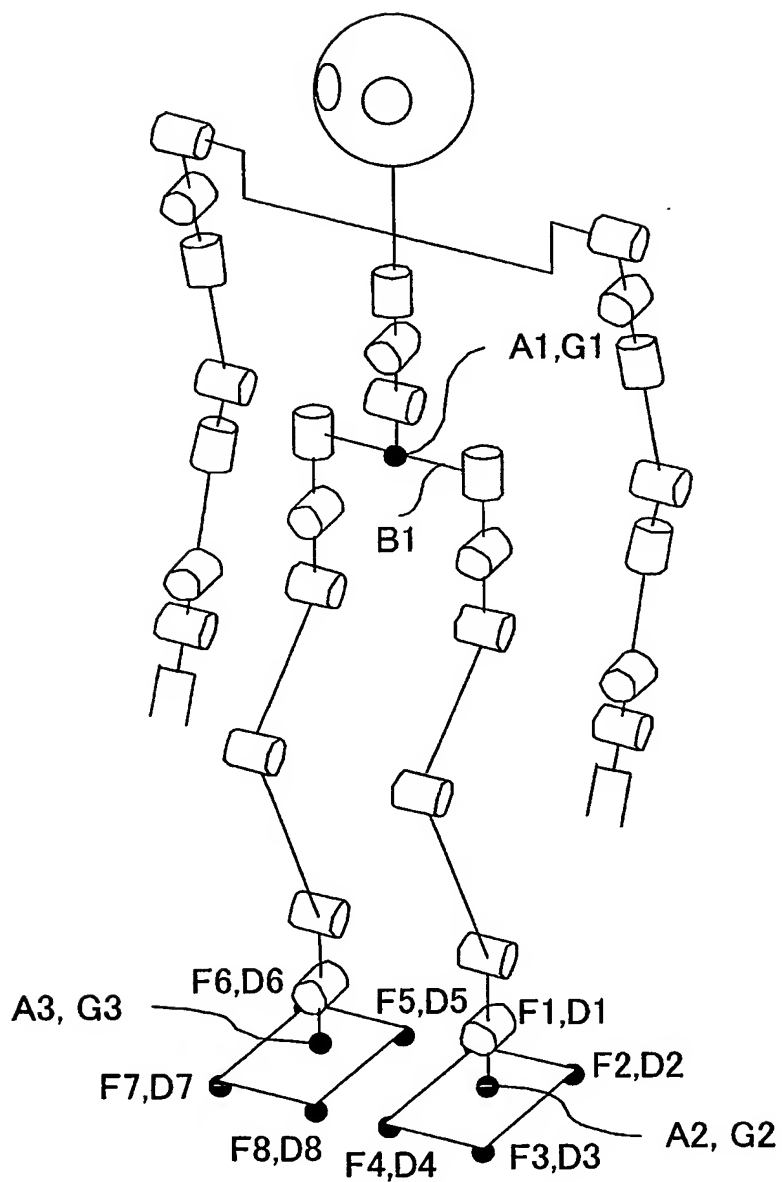


図 1

2/9

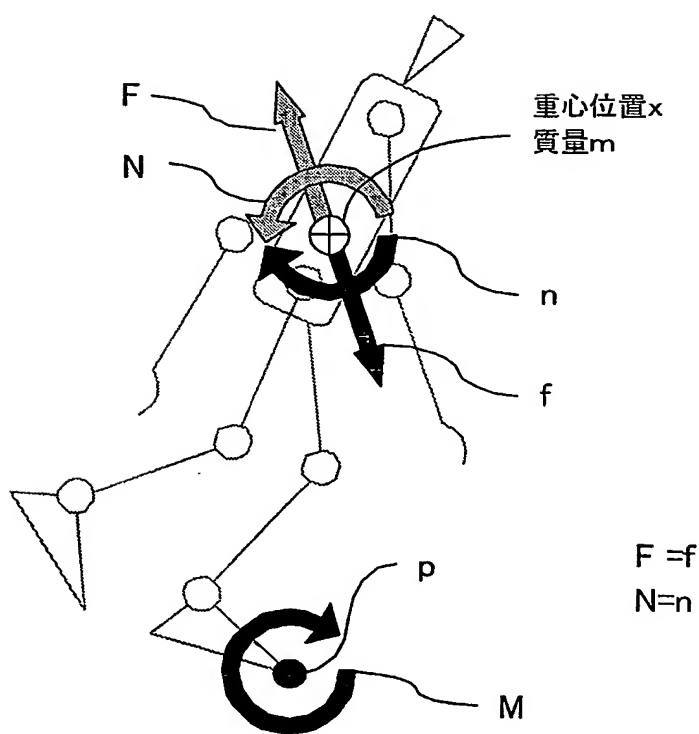


図2

3/9

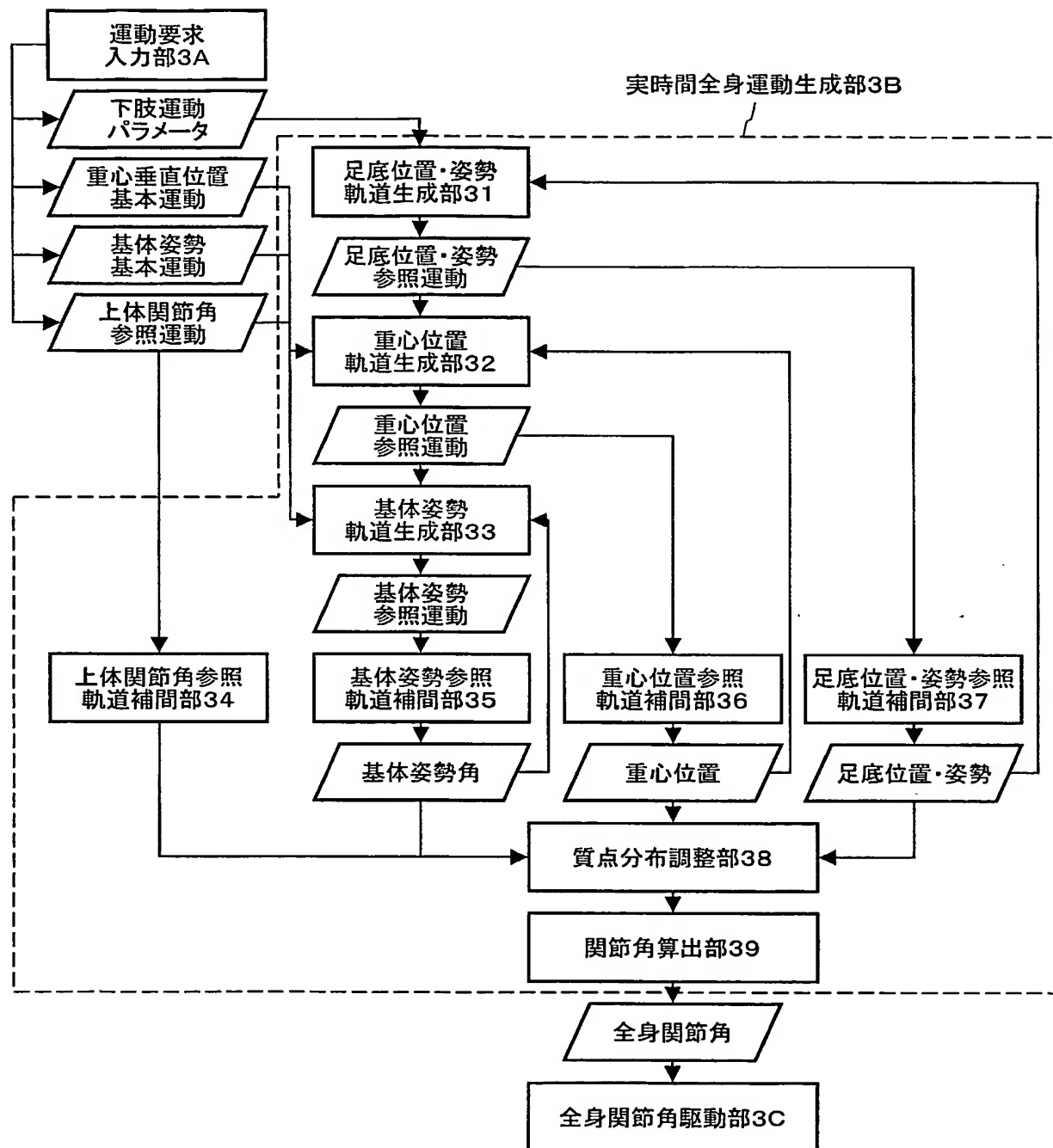


図3

4/9

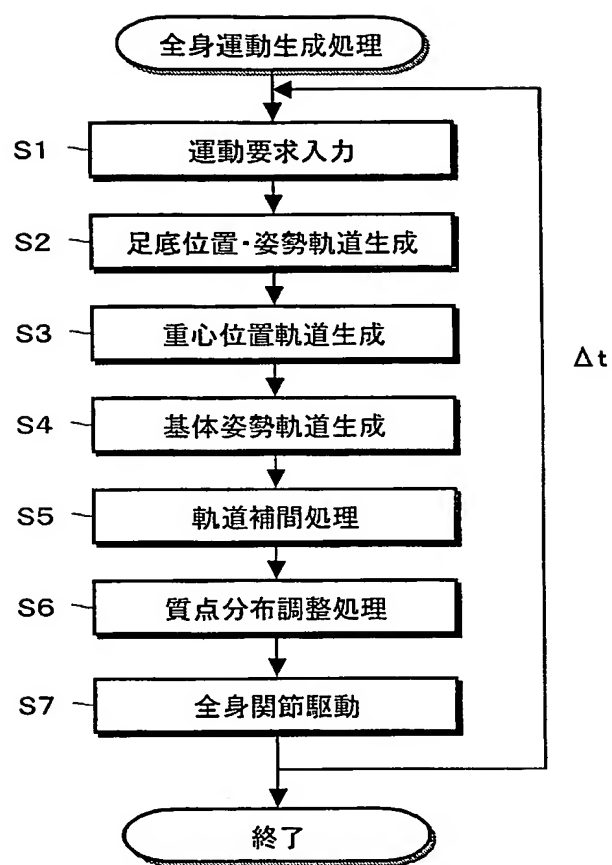


図4

5/9

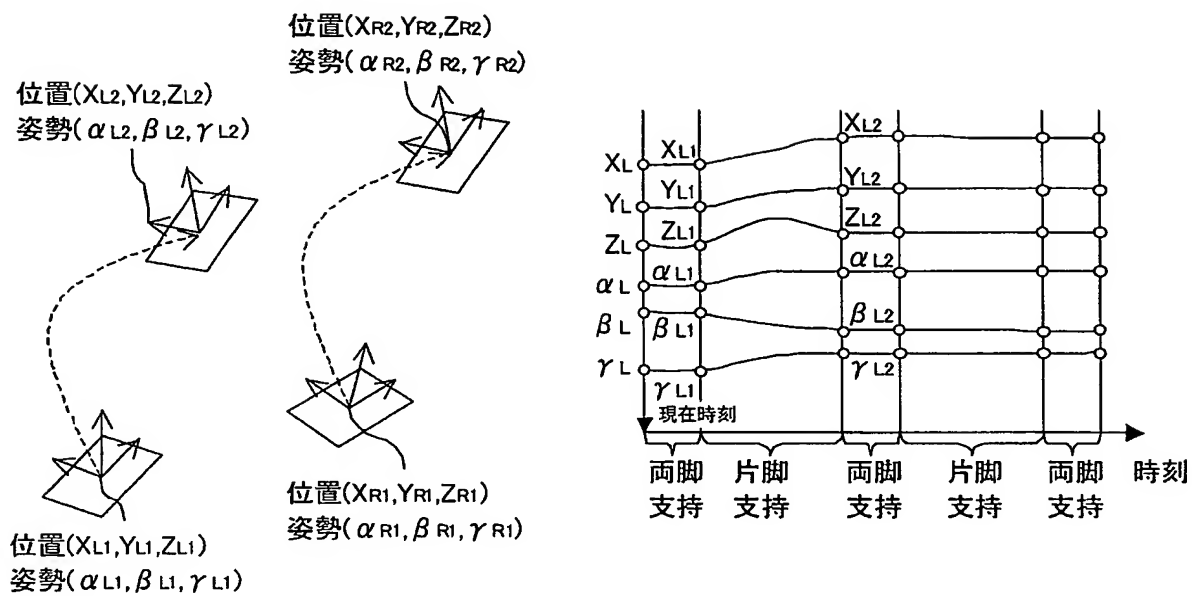


図5

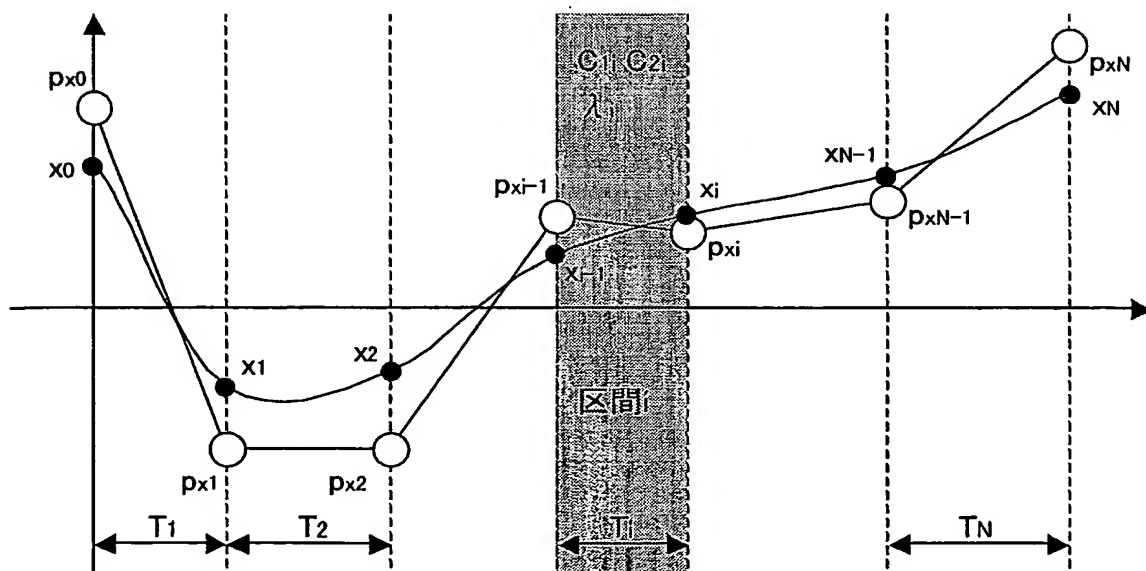


図6

6/9

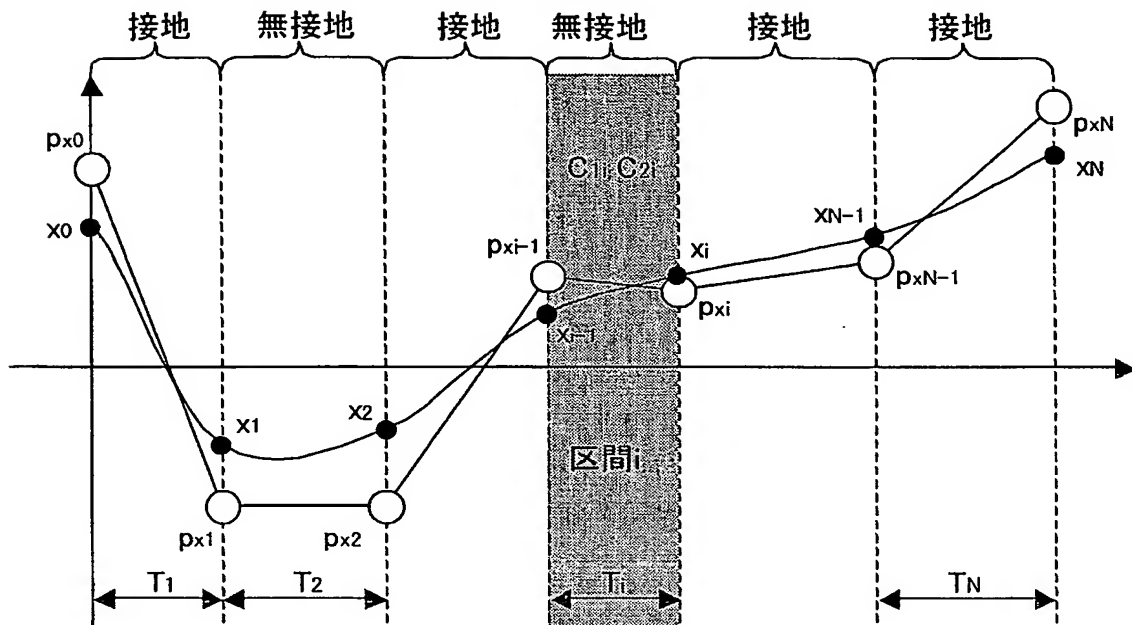


図7

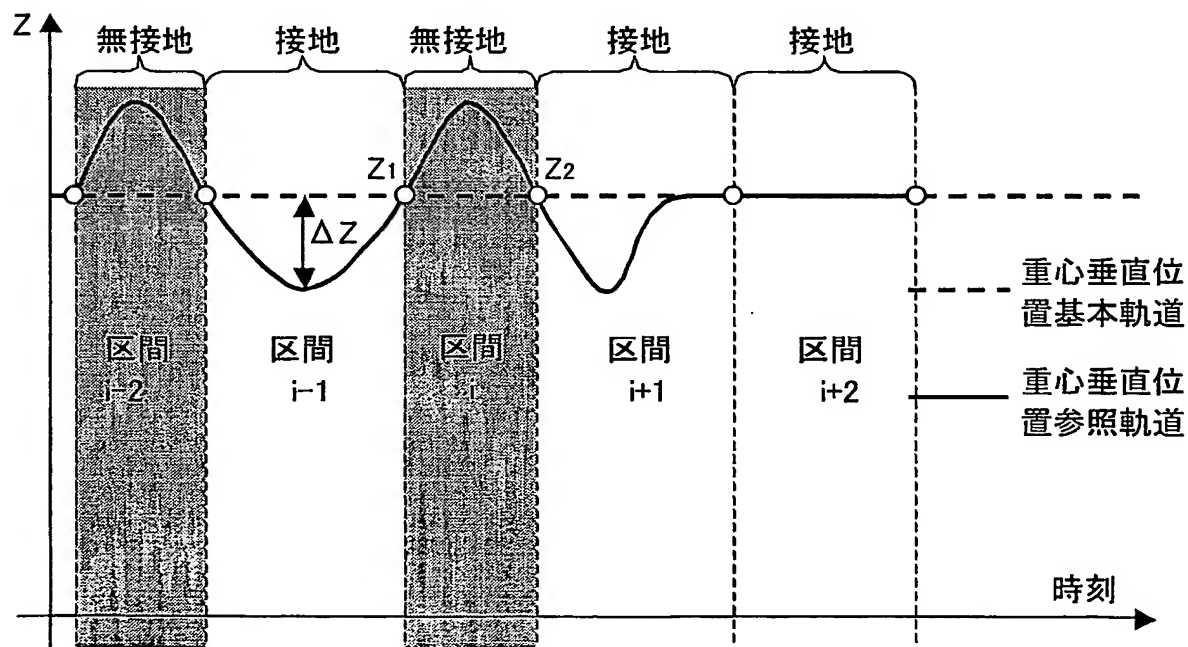


図8

7/9

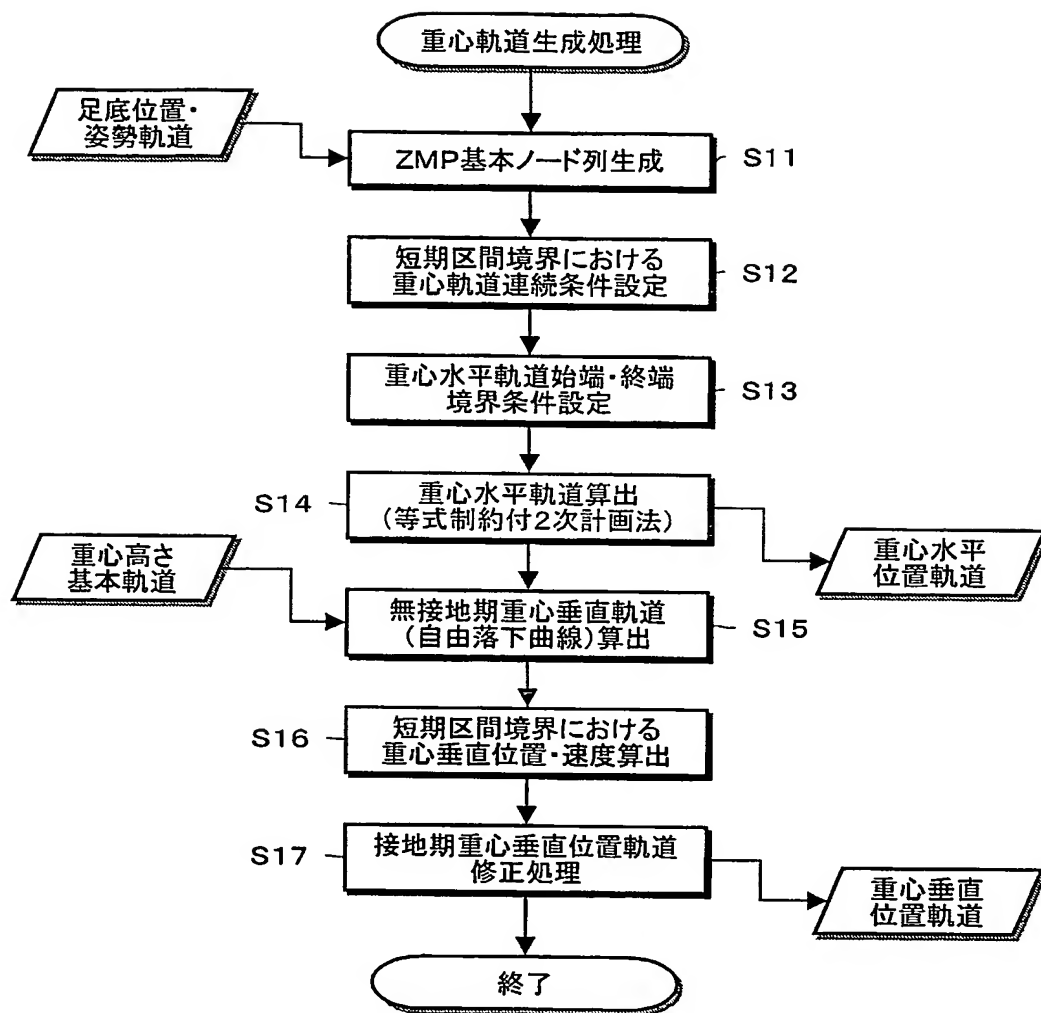


図9

8/9

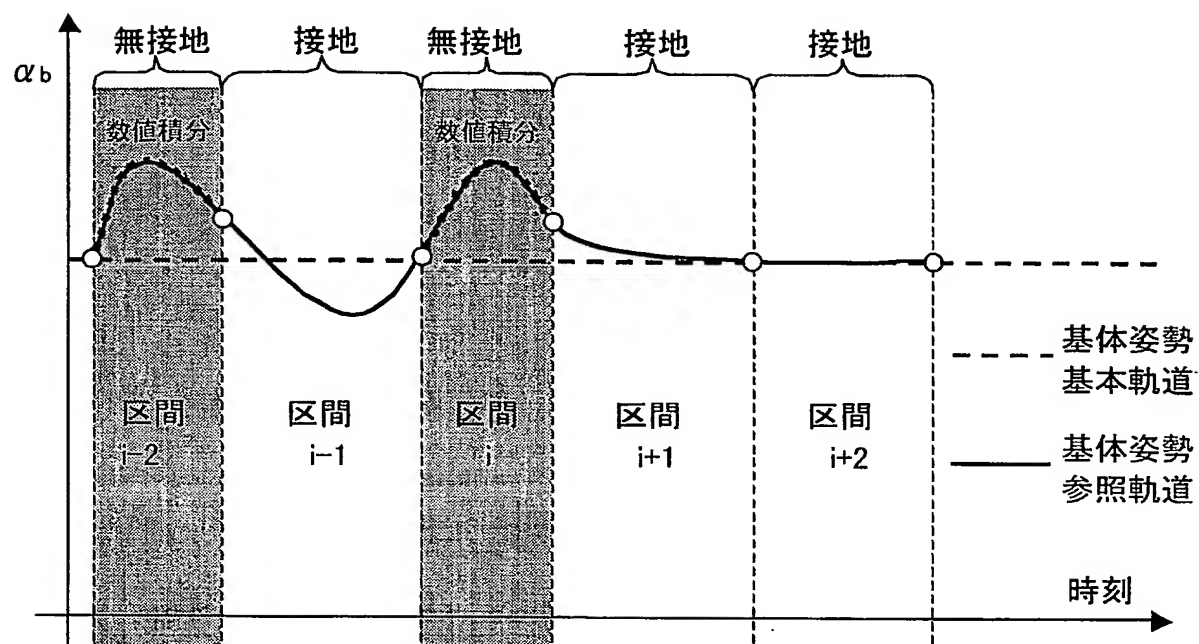


図10

9/9

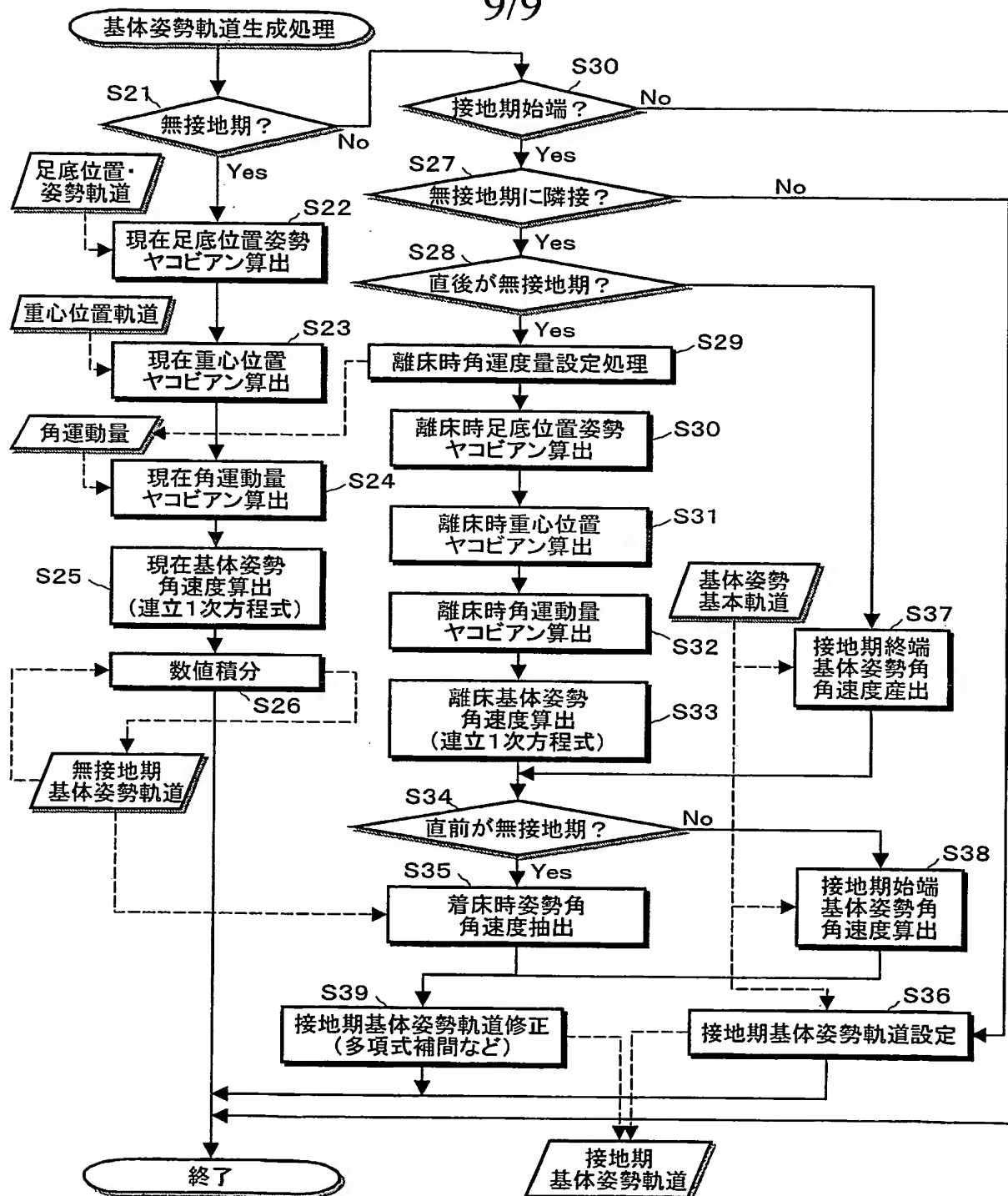


図 11